This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

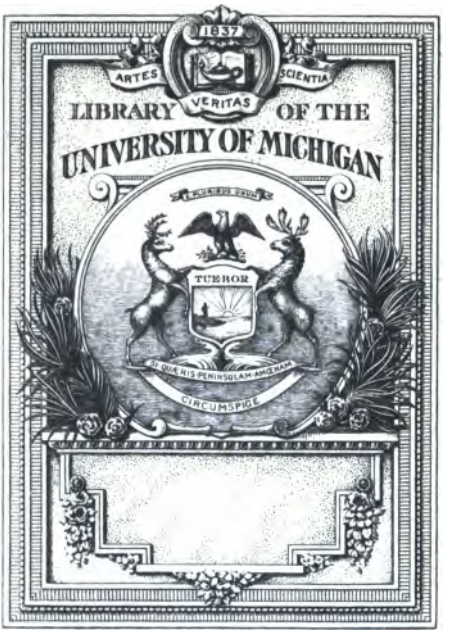
+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`


1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
TUEBOR
SI QUÆRIS PENINSULAM AMŒNAM
CIRCUMSPICE

QC
518
.G279t

TRAITÉ

D'ÉLECTRICITÉ

Paris. — Imprimerie de L. MARTINET, rue Mignon, 2.

TRAITÉ

D'ÉLECTRICITÉ

PAR

J. GAVARRET

Professeur de physique médicale à la Faculté de médecine de Paris.

TOME PREMIER

avec 280 figures dans le texte

PARIS

LIBRAIRIE DE VICTOR MASSON

PLACE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE

M DCCC VII

Droit de traduction réservé.

QC
518
.C34t

AVANT-PROPOS.

Library cour.
Perelle
5-22-24
9749
2v

L'ouvrage que nous publions aujourd'hui s'adresse surtout aux nombreux élèves qui suivent les cours de nos grands établissements d'instruction publique ; c'est pour eux et dans l'espoir de leur être utile que nous l'avons écrit. Sans nous écarter un seul instant ni de la voie expérimentale, ni de la forme élémentaire, nous nous sommes efforcé de mettre ce Traité au courant de la science ; nous avons voulu qu'il pût fournir au lecteur des notions précises sur les phénomènes fondamentaux, les lois générales et les principales applications de l'électricité.

Nous avons, à dessein, évité de parler d'une manière spéciale des applications physiologiques et médicales de l'électricité ; la raison en est bien simple. Grâce aux

recherches des physiciens modernes, l'élect[illegible] a fait de tels progrès, qu'il n'est plus [illegible] lui accorder, dans un traité général, assez de place pour étudier, avec tous les développements convenables, le rôle que l'électricité joue, comme cause et comme effet, dans les phénomènes de la vie. Dans la série de monographies que nous nous sommes engagé à publier sous le titre commun de *physique médicale*, l'électro-physiologie est, à nos yeux, une des plus importantes. Nous avons, de longue main et avec tous les soins possibles, réuni les matériaux de ce travail; si sa publication a été un peu retardée, c'est que nous avons cru convenable et utile de le faire précéder d'une exposition de la théorie physique de l'électricité.

QC
578
.G279t

TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ

PAR

J. GAVARRET
Professeur de physique médicale à la Faculté de médecine de Paris.

TOME PREMIER

avec 280 figures dans le texte

PARIS
LIBRAIRIE DE VICTOR MASSON
PLACE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE
M DCCC LVII

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ.

Les phénomènes électriques sont très nombreux et très variés; ils se partagent naturellement en un petit nombre de groupes dont les différences tendent tous les jours à disparaître, dont la communauté d'origine est incontestable, mais encore assez bien délimités pour qu'il nous ait paru avantageux de les étudier isolément. Les grandes divisions consacrées par l'usage se prêtent facilement à l'exposition des faits; nous avons cru devoir les conserver. Mais, tout en adoptant la marche généralement suivie dans les traités d'électricité, il nous a semblé que le moment était venu de faire connaître aux élèves des travaux d'une haute importance qui n'ont pas encore trouvé place dans les ouvrages classiques, et surtout d'appeler leur attention sur les rapports intimes qui existent entre les diverses parties de la science. Nous n'avons rien négligé pour atteindre ce but. D'une part, nous avons abondamment puisé dans les grands recueils d'observations; d'autre part, nous avons particulièrement insisté sur les faits propres à démontrer que, sous des formes diverses, c'est un seul et même agent qui tantôt s'accumule sur les conducteurs des machines à plateau de verre, tantôt parcourt le circuit de la pile, tantôt

communique aux aimants naturels ou artificiels leurs propriétés spéciales.

Dans la première section, consacrée à l'électricité statique, après avoir établi les lois des actions électriques et de la distribution de l'électricité à la surface des conducteurs, nous faisons une étude détaillée des phénomènes d'induction électro-statique, et des divers modes suivant lesquels s'opèrent les décharges électriques.

La seconde section est une exposition succincte des phénomènes magnétiques et de la théorie physique des aimants considérés à part, abstraction faite de tout rapport avec l'électricité. Cette étude nous a paru nécessaire pour comprendre l'emploi de l'aiguille aimantée dans les recherches d'électricité dynamique, la signification d'expressions consacrées par l'usage, l'influence de la terre sur les courants électriques et la nombreuse série des observations relatives à l'action magnétique du globe.

La troisième section est consacrée à la recherche des sources et à l'étude des effets de l'électricité dynamique. Par ses rapports avec les phénomènes physiologiques, par son emploi en thérapeutique, aussi bien que par ses brillantes et utiles applications industrielles, par ses points de contact avec la chimie et par les grandes questions théoriques qu'elle soulève, l'électricité dynamique est aujourd'hui une des branches les plus importantes de la physique; aussi n'avons-nous pas craint de donner un grand développement à son histoire.

La quatrième et dernière section contient tout ce qui est relatif à l'étude de l'électricité atmosphérique.

PREMIÈRE SECTION.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

Le verre, la cire d'Espagne, la gomme laque, la résine, le soufre, etc., etc., sont, à l'état naturel, sans action sur les corps environnants; ces mêmes substances, après avoir été frottées avec une peau de chat, un morceau de drap de laine ou une étoffe de soie, attirent les barbes de plume, les fragments de papier, la sciure de bois, les particules métalliques, et généralement tous les corps légers placés dans leur voisinage. Cette propriété nouvelle n'est qu'un des modes de manifestation d'un *agent* particulier développé par le frottement, et appelé *électricité*, du nom grec ἤλεκτρον, qui signifie *ambre*, parce que ce phénomène d'attraction, très anciennement connu, a été observé pour la première fois sur l'ambre jaune, par les philosophes grecs. Un cylindre métallique, frotté de la même manière et tenu *directement* dans la main, n'exerce aucune action attractive sur les corps légers; il ne se charge pas d'*électricité*. Cette différence d'action après le frottement, servit d'abord à diviser tous les corps de la nature en deux grandes classes.

Dans une première classe, on plaça la résine, le verre, la cire d'Espagne, le soufre, la laine, la soie, le bois bien sec, et tous les corps qui, frottés et tenus *directement* dans la main, se chargent d'électricité. Ces substances furent appelées *idio-électriques*; on les considérait comme

possédant seules la propriété de s'électriser par le frottement.

La deuxième classe comprenait les métaux, les matières végétales et animales *humides* et tous les corps qui, tenus directement dans la main, ne donnent, après le frottement, aucun signe sensible d'électrisation. Toutes ces substances furent appelées *anélectriques;* on pensait qu'elles ne peuvent pas s'électriser par le frottement.

Cette classification est vicieuse en ce qu'elle tend à établir, entre les corps, une différence fondamentale que l'observation ne justifie pas. En effet, un cylindre métallique porté (Fig. 1) sur un pied P de verre ou de résine, ou tenu dans la main (Fig. 2) à l'aide d'un manche de

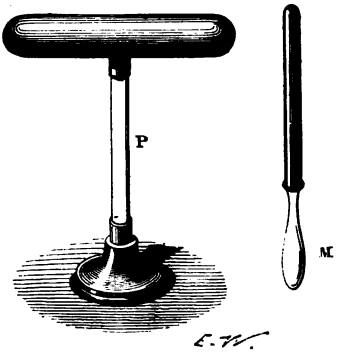


Fig. 1. Fig. 2.

verre M, se conduit comme un corps *idio-électrique*. Frotté, dans ces circonstances, avec une peau de chat ou une étoffe de laine, il se charge d'*électricité*, et attire les corps légers placés dans son voisinage. D'où provient donc

la différence constatée entre les matières dites *idio-électriques* et les substances appelées *anélectriques?*

Lorsqu'on frotte une substance *idio-électrique* sur une portion quelconque de sa surface, la partie frottée acquiert *seule* la propriété d'attirer les corps légers; l'électricité reste localisée sur les points où le frottement l'a développée. Au contraire, quel que soit le volume d'un corps *anélectrique*, d'un cylindre métallique porté sur des pieds de verre ou de résine, il suffit de le frotter sur une portion quelconque de sa surface pour que l'électricité, ainsi développée, se propage aux parties voisines, et l'envahisse instantanément dans toute son étendue. Les corps *idio-électriques* ne livrent pas passage à l'électricité, ne lui permettent pas de se déplacer à leur surface; les *anélectriques*, au contraire, laissent l'électricité se répandre librement à leur surface dans toutes les directions; les premiers sont de *mauvais conducteurs*, les seconds sont de *bons conducteurs* de l'électricité. Cette distinction nous servira à comprendre pourquoi, contrairement à ce qu'on observe avec des corps *idio-électriques*, les substances *anélectriques* ne s'électrisent par le frottement qu'à la condition d'être appuyées sur des supports *mauvais conducteurs.*

Le corps de l'homme, comme d'ailleurs toute matière organisée *humide*, est un assez bon conducteur d'électricité. Ainsi, lorsqu'un observateur tient *directement* dans la main un cylindre métallique et qu'il le frotte avec une peau de chat ou un drap de laine, l'électricité développée sur le métal se répand instantanément sur toute la surface de son corps, et, de là, passe dans le sol qui est aussi un

bon conducteur. Or, lorsqu'un corps conducteur *électrisé* est mis en contact avec une *sphère conductrice*, il lui cède une partie de son électricité; l'affaiblissement qu'éprouvent, dans ce cas, les propriétés électriques du corps touché est d'autant plus considérable que le volume de la sphère est lui-même plus grand. On conçoit dès lors comment, en raison de l'étendue de la surface de la terre, un *conducteur électrisé* cesse de donner des signes appréciables de réaction électrique du moment où il est mis en communication avec le sol, soit directement, soit par l'intermédiaire de supports *conducteurs*. C'est pour cette raison que, dans l'histoire de l'électricité, on donne à la terre le nom de *réservoir commun*.

Le frottement développe donc toujours de l'électricité sur les substances métalliques. Dans le cas où un corps métallique communique avec la terre par un support *conducteur*, cette électricité s'écoule dans le sol à mesure qu'elle est produite; dans le cas où le corps métallique est placé sur un support de verre ou de résine, l'électricité, ne pouvant pas s'écouler dans le sol, reste sur le métal et manifeste sa présence par les mouvements imprimés aux corps légers placés dans son voisinage.

Les corps *idio-électriques* ou *mauvais conducteurs* sont aussi appelés *isolants*. Quand un cylindre métallique est placé sur un pied de verre ou sur un support quelconque *mauvais conducteur*, il n'a plus de *communication électrique* avec le sol; on dit alors que le cylindre est *isolé*.

Mais les corps *idio-électriques*, comme le verre, la résine, le soufre, la gomme laque, etc., s'électrisent par le frottement, même alors qu'ils sont appuyés directement

sur le sol ou qu'ils sont en communication avec lui par l'intermédiaire de supports conducteurs. Cela tient uniquement à ce que les portions de ces corps qui touchent les *conducteurs* ne livrent pas passage à l'électricité développée et accumulée sur les autres points de leur surface, et jouent, par rapport à eux, le rôle de véritables *isolants*.

Il résulte des considérations précédentes que l'air est un corps *isolant*. Si, en effet, l'air conduisait bien l'électricité, il serait impossible de retenir cet agent accumulé à la surface des corps et les phénomènes électriques nous seraient complétement inconnus. Du reste, comme la vapeur d'eau oppose moins de résistance que l'air au passage de l'électricité, le *pouvoir isolant* de l'atmosphère varie avec son état hygrométrique, et, toutes choses égales d'ailleurs, l'air fait éprouver aux corps électrisés des pertes d'autant plus considérables qu'il contient lui-même plus de vapeur d'eau.

Ainsi, tout corps placé dans des circonstances convenables s'électrise quand on le frotte, c'est-à-dire acquiert la propriété d'attirer les corps légers placés dans son voisinage.

En outre, l'expérience prouve qu'un *conducteur isolé*, quand on le met en contact avec un corps électrisé, emprunte à ce corps une partie de son électricité, et la conserve d'autant plus longtemps que l'air environnant est plus sec et que ses supports sont eux-mêmes plus *mauvais conducteurs*.

Pour étudier plus complétement les actions exercées par les substances électrisées sur les corps légers, prenons un

pendule électrique. Cet appareil (Fig. 3) se compose d'une petite sphère *conductrice* A de moelle de sureau suspendue à un fil de soie *isolant*, E. Pour rendre l'isolement de la balle de sureau plus complet, on a soin de fixer le fil de soie à un support de verre, C, enduit d'un vernis à la gomme laque.

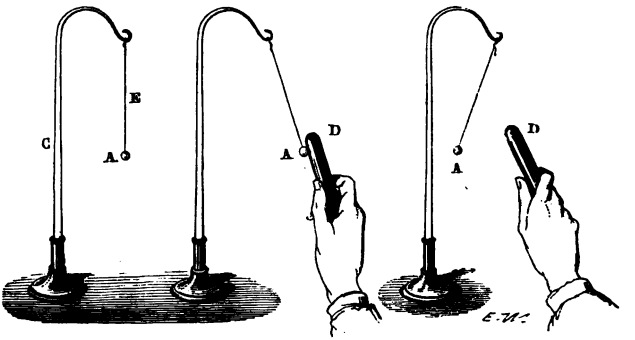


Fig. 3. Fig. 4. Fig. 5.

Si à ce pendule on présente un cylindre D de résine ou de verre électrisé par le frottement, la balle de sureau est attirée (Fig. 4) et vient s'appliquer contre le cylindre D. Par ce contact elle s'électrise, et, comme elle est isolée, elle conserve l'électricité empruntée au cylindre D.

Dès que le contact a eu lieu, la balle de sureau électrisée est vivement repoussée (Fig. 5), et se maintient le plus loin possible du cylindre D tant qu'elle conserve des traces sensibles d'électrisation.

Il suffit de ramener la balle A à l'*état naturel*, c'est-à-dire de lui enlever son électricité en la touchant avec le doigt ou en la mettant en communication avec le sol au moyen

d'un corps conducteur quelconque, pour qu'elle soit de nouveau attirée par le cylindre D et de nouveau repoussée après s'être électrisée par contact.

Ainsi, tout corps électrisé *attire* un corps *à l'état naturel* placé dans son voisinage, et le *repousse* après lui avoir communiqué, par le contact, une portion de son électricité propre.

Electrisons la balle de sureau A du pendule électrique (Fig. 3) en la touchant avec un *bâton de résine* frotté avec *un morceau de drap de laine;* cette balle sera *repoussée* par le *bâton de résine* et *attirée* par un cylindre de *verre poli* frotté également avec *un morceau de drap de laine.* Réciproquement, si la balle de sureau A a été primitivement électrisée en la touchant avec un cylindre de *verre poli* frotté avec *un morceau d'étoffe de laine*, elle sera *repoussée* par le cylindre de *verre* et *attirée* par le bâton de *résine.*

Tous les corps de la nature, placés dans des circonstances qui leur permettent de s'électriser par le frottement, se comportent comme le verre ou comme la résine quand on les approche d'un pendule préalablement électrisé. Les uns *attirent* la balle de sureau électrisée par son contact avec un bâton de résine, et la *repoussent* quand elle a été électrisée avec un cylindre de verre; les autres, au contraire, *repoussent* la balle de sureau électrisée avec un bâton de résine et l'*attirent* quand elle a touché un cylindre de verre électrisé. On est ainsi conduit à admettre l'existence de deux espèces d'électricité. L'une, l'électricité *vitrée*, est fournie par un cylindre de verre frotté avec *un morceau de drap de laine;* l'autre, l'électricité *résineuse*,

est développée sur un bâton de résine également frotté avec *un morceau de drap de laine*.

Ces dénominations seraient acceptables si le *même* corps soumis au frottement fournissait *toujours* la même espèce d'électricité ; mais, comme l'espèce d'électricité dont se charge le corps frotté varie avec le corps frottant lui-même et avec les circonstances au milieu desquelles le frottement est exécuté, on a dû les abandonner et les remplacer par des noms plus généraux, indépendants de la nature des corps en présence et qui indiquent d'une manière plus nette les propriétés contraires des forces développées. On est convenu d'appeler électricité *positive* celle qu'on développe sur le *verre poli* en le frottant avec *de la laine*, et électricité *négative* celle dont se charge *la résine* frottée aussi avec *de la laine*. Il résulte de ces faits que :

Deux corps se repoussent quand ils sont chargés de la même espèce d'électricité, et s'attirent quand ils sont chargés, l'un d'électricité *positive*, l'autre d'électricité *négative*.

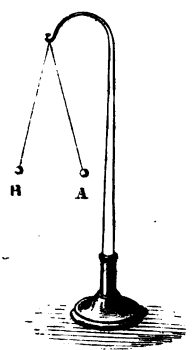


Fig. 6.

Ce principe général peut, d'ailleurs, être démontré directement par deux expériences très simples.

1° A un pied isolant (Fig. 6), attachons, par son milieu, un fil *conducteur* de lin portant une balle de moelle de sureau à chacune de ses extrémités. Quel que soit le corps électrisé avec lequel on les touche, ces deux balles se char-

gent de la même espèce d'électricité, se repoussent et restent écartées tant qu'elles conservent des traces sensibles d'électrisation.

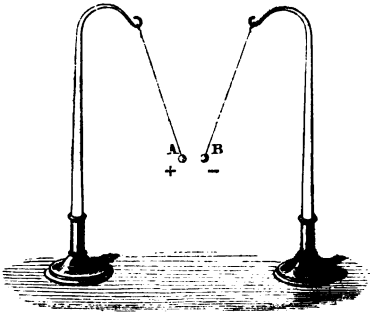


Fig. 7.

2° Prenons maintenant (Fig. 7) deux pendules électriques séparés; chargeons la balle A d'électricité positive, et la balle B d'électricité négative; si les deux pendules sont placés à une distance convenable, les deux balles commencent par s'attirer, puis se précipitent l'une sur l'autre. Après le contact, elles ne donnent plus de trace sensible d'électrisation et retombent dans la verticale.

Lorsque deux corps, dont l'un au moins est isolant, sont frottés l'un contre l'autre, ils s'électrisent tous les deux : l'un prend l'électricité positive, et l'autre l'électricité négative. Soient, par exemple (Fig. 8), C un disque de verre poli et B un disque de bois recouvert d'une étoffe de laine, tous deux munis de manches isolants de verre enduits d'un vernis à la gomme laque. Si on les frotte l'un contre l'autre et qu'on les présente successivement à un

pendule électrique A chargé d'électricité positive, la balle de sureau est repoussée par le disque de verre C et attirée par le disque B. Les mêmes phénomènes se manifestent

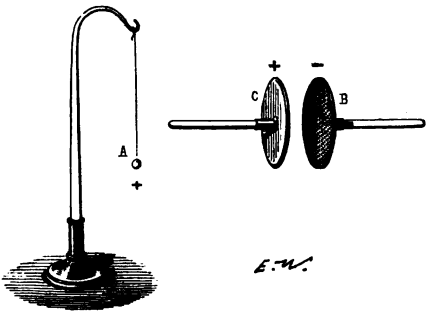


Fig. 8.

quels que soient les corps employés pourvu qu'on ait soin de les tenir, pendant le frottement, par des manches isolants. D'ailleurs, les circonstances qui influent sur l'espèce de l'électricité dont se charge chacun des corps frottés sont très diverses et très variées. Ainsi :

1° Dans la série suivante,

Peau de chat,	Plumes,	Soie,
Verre poli,	Bois,	Gomme laque,
Drap de laine,	Papier,	Verre dépoli,

les corps sont rangés dans un ordre tel que chacun d'eux se charge d'électricité *positive* quand on le frotte avec un quelconque des corps qui le suivent, et prend, au contraire, l'électricité *négative* quand il est frotté avec un quelconque des corps qui le précèdent.

2° Si l'on frotte l'un contre l'autre deux échantillons d'un même corps, il suffit d'une différence dans la tem-

pérature ou dans le poli de la surface pour qu'ils se chargent d'électricités opposées. L'échantillon *le plus chaud* ou *le plus rugueux* est toujours celui qui prend l'électricité *négative*.

3° Une étoffe de soie blanche s'électrise *positivement* quand on la frotte avec une étoffe de soie noire, cette dernière prend en même temps l'électricité *négative*.

4° On fait glisser l'un sur l'autre deux fragments d'un même ruban de soie mis en croix; celui qui est frotté *transversalement* prend l'électricité *négative*, l'autre se charge d'électricité *positive*.

5° Une poudre métallique glissant sur une plaque du même métal se charge d'électricité *négative*, tandis que la plaque devient *positive*.

Le frottement des liquides et des gaz contre les corps solides peut aussi développer de l'électricité. Quand on fait tomber une pluie fine de mercure sur un cylindre de verre bien sec, le métal et le verre se chargent d'électricités contraires. Ce fait explique un phénomène observé dans les baromètres bien purgés d'air. Lorsque, dans l'obscurité, on incline rapidement les baromètres, le mercure, en se précipitant dans la chambre vide qui le surmonte, frotte contre le verre et détermine l'apparition d'une lueur phosphorescente.

Un carreau de verre s'électrise positivement quand, avec un soufflet, on dirige un courant d'air contre sa surface. Une étoffe de soie vivement agitée dans l'air se charge aussi d'électricité.

Le frottement exercé contre les parois des tuyaux d'échappement, par le jet de vapeur et de gouttelettes

très fines d'eau que fournissent les chaudières à haute pression, développe des quantités considérables d'électricité. Ce phénomène a été mis à profit dans ces derniers temps pour construire des machines électriques très puissantes.

Quand on frotte l'un contre l'autre deux corps *conducteurs*, deux métaux par exemple, le corps frottant et le corps frotté se chargent aussi l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative. Mais, dans ce cas, les électricités se recombinent sur place avec tant de facilité que, pour les obtenir à l'état libre, sur les surfaces des corps employés, il faut recourir à des précautions particulières.

Hypothèses théoriques. — Deux grandes hypothèses ont été proposées par les physiciens pour expliquer les phénomènes électriques. L'une, imaginée par Franklin, adoptée par Cavendish, Cavallo, Beccaria, Æpinus, Volta, etc., est encore admise par quelques physiciens; l'autre, développée par Symmer, adoptée par Coulomb, Poisson, etc., est généralement professée en France.

Franklin admettait l'existence *d'un seul fluide électrique*, agissant par répulsion sur lui-même et par attraction sur les matières pondérables. Dans cette manière de voir, ce *fluide* est répandu dans toutes les substances de la nature; pour que l'*équilibre électrique* existe entre un corps quelconque et les corps qui l'environnent, il faut que chacun d'eux contienne une certaine quantité d'électricité dépendant de sa masse et de sa nature. Le frottement et les autres moyens d'électrisation agissent en augmentant ou en diminuant la quantité d'électricité que renferment les corps. Une substance est électrisée *positivement* ou

négativement suivant qu'elle contient une quantité d'électricité *supérieure* ou *inférieure* à celle qui correspond à cet *état neutre ou d'équilibre*. Malgré son apparente simplicité, cette hypothèse de Franklin ne se prête que très difficilement à l'explication des attractions et des répulsions observées entre corps électrisés.

Dans l'hypothèse de Symmer, on admet l'existence de deux fluides électriques : l'un est fourni par le verre poli frotté avec de la laine, c'est le fluide *vitré* ou *positif*; l'autre se développe sur un bâton de résine frotté avec de la laine, c'est le fluide *résineux* ou *négatif*. Chacun de ces fluides impondérables est formé de molécules qui se *repoussent* mutuellement, tandis que les molécules de l'un *attirent* les molécules de l'autre. Dans les *corps conducteurs*, ces fluides se meuvent librement et leurs molécules, obéissant à leur répulsion mutuelle, s'accumulent à la surface, où elles sont retenues par la résistance que, en sa qualité de corps isolant, l'air oppose à leur déplacement. Les molécules des corps *mauvais conducteurs* ne permettent pas le déplacement des fluides électriques qui restent localisés sur les parties où ils ont été développés. Deux quantités égales de fluide *positif* et de fluide *négatif* mis en présence obéissent à leur attraction mutuelle, se combinent et reconstituent le fluide *neutre* ou *naturel*. Ce fluide *neutre* existe normalement dans tous les corps de la nature, sa présence n'est traduite par aucun phénomène extérieur à cause des propriétés contraires de ses deux éléments constituants.

L'action du frottement et des autres moyens d'électrisation se borne à une décomposition du fluide *neutre;*

l'un des corps se charge d'électricité *positive*, l'autre prend l'électricité *négative*, et les fluides élémentaires, rendus libres, manifestent leur présence par les phénomènes ordinaires d'attraction et de répulsion. Ces idées de Symmer sur la composition du fluide neutre, et sur le mode d'action des divers procédés d'électrisation, sont d'accord avec les résultats fournis par les deux expériences suivantes :

1° On frotte deux corps l'un contre l'autre : tant que dure leur contact il est impossible de constater aucun signe sensible de réaction électrique; au moment où les deux corps sont séparés, ils sont électrisés tous les deux, l'un *négativement*, l'autre *positivement*.

2° Deux balles de moelle de sureau isolées et chargées d'une même quantité de fluides contraires commencent par s'attirer; du moment où elles se sont touchées, elles ne conservent plus aucune trace d'électrisation et retombent à l'état naturel.

Dans l'état actuel de la science, beaucoup d'objections s'élèvent contre l'hypothèse de Symmer. Cependant la théorie des deux fluides a le grand avantage de se prêter facilement à l'exposition et au classement des faits observés; elle nous paraît devoir être conservée, mais comme pure convention de langage. L'expérience, en effet, démontre que, sous l'influence du frottement, de l'action chimique, de la chaleur, etc., la surface de contact de deux corps en présence devient le siége d'un travail spécial qui développe dans ces corps deux *forces contraires*, mais elle n'a rien appris de positif sur la *nature* de ces forces; les expressions de *fluide positif* et de *fluide négatif* ne doivent donc être acceptées que comme des moyens de dénommer ces

forces et d'indiquer, en même temps, que leurs actions sont opposées.

CHAPITRE PREMIER.

DES FORCES ÉLECTRIQUES.

Les fait précédemment établis nous conduisent naturellement à l'examen de deux questions importantes. Considérant les forces électriques en elles-mêmes et indépendamment des procédés employés pour leur donner naissance, nous devons chercher à déterminer les lois suivant lesquelles s'exercent les attractions et les répulsions électriques, et à préciser le mode de distribution de l'électricité dans les corps conducteurs.

ARTICLE PREMIER.

LOIS DES ATTRACTIONS ET DES RÉPULSIONS ÉLECTRIQUES.

A la fin du siècle dernier, Coulomb (1), dont les travaux ont si puissamment contribué au progrès de l'électricité statique, publia une très belle série de recherches expérimentales sur la mesure des attractions et des répulsions électriques et la détermination des lois de leurs

(1) Les travaux de Coulomb sur l'électricité composent une série de mémoires, tous publiés dans la grande collection des *Mémoires de l'ancienne Académie des sciences*. Année 1785, pages 569, 578, 612; — année 1786, page 67; — année 1787, page 421; — année 1788, page 617; — année 1789, page 455.

variations. A cet effet, il se servit de la balance de torsion, instrument d'une extrême sensibilité qui permet d'apprécier, avec une très grande exactitude, l'intensité des forces les plus faibles.

La balance de torsion, employée par Coulomb dans ses recherches sur l'électricité, se compose (Fig. 9) d'une

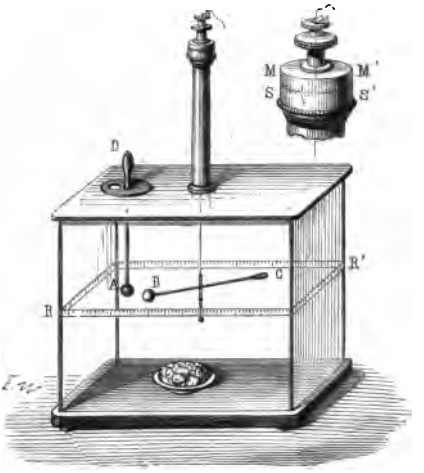


Fig. 9.

cage de verre cubique ou cylindrique, encastrée par sa partie inférieure dans une table de bois bien sec, et fermée à sa partie supérieure par une plaque de verre. L'air qu'elle contient est desséché à l'aide d'une capsule remplie de chlorure de calcium, déposée sur le fond de bois. Vers le milieu de sa hauteur, la cage porte une échelle horizontale RR' divisée en degrés. Sur le milieu de la plaque de verre formant couvercle, s'élève une colonne

de verre creuse et verticale dont l'extrémité supérieure porte une garniture métallique composée de deux tambours. L'inférieur SS′ est fixe, et sa circonférence est divisée en degrés. Le supérieur MM′ tourne à frottement dur sur le tambour inférieur; il porte une division formant vernier qui sert à mesurer, en degrés et fractions de degré, l'étendue du mouvement de rotation qu'on lui imprime dans chaque expérience. Le *zéro* de la graduation du tambour fixe SS′ est placé dans le même plan vertical que le zéro de l'échelle horizontale RR′ tracée sur la cage de verre.

Au centre du tambour mobile MM′ est fixée une pince qui maintient un fil métallique très fin dans l'axe de la colonne creuse et de la cage de verre. Ce fil métallique est tendu par un cylindre de laiton suspendu à sa partie intérieure. A ce cylindre est fixée une tige horizontale de gomme laque portant à son extrémité une balle de moelle de sureau dorée, B, bien équilibrée par un petit contrepoids, C. L'axe de l'aiguille, le centre de la petite balle de sureau B et l'échelle RR′, doivent être situés dans un même plan horizontal.

Le couvercle de la cage est percé d'une ouverture à travers laquelle passe une tige verticale isolante de verre enduite d'un vernis à la gomme laque qui porte, à sa partie inférieure, une petite sphère métallique A; nous appellerons *chargeur* de la balance ce petit appareil composé de la tige isolante, de la sphère métallique A et du manche isolant D. Tout est disposé de manière que le centre de la sphère A soit contenu dans le plan horizontal de l'échelle RR′, et dans le plan vertical qui correspond au

zéro de cette échelle et au zéro de la division du tambour fixe SS′.

Pour faire, avec cette balance, une observation de répulsion entre deux corps chargés du même fluide électrique, on retire le *chargeur* isolé A; on tourne alors le tambour MM′ jusqu'à ce que le zéro de son vernier coïncide avec celui de la graduation du tambour fixe SS′. Le fil suspenseur n'éprouve aucune torsion; l'aiguille horizontale de gomme laque obéit au mouvement, et se place de manière que le centre de la sphère B se trouve dans le plan vertical qui passe par le zéro de l'échelle RR′ et par le zéro de la division du tambour fixe SS′. On communique alors une charge d'électricité à la balle A du chargeur que l'on remet en place. Au moment où la balle A touche la balle mobile B, elle lui cède une partie de son électricité; cette dernière est repoussée et le fil est tordu sur lui-même. Après quelques oscillations, l'aiguille horizontale s'arrête dans une position fixe telle que la force répulsive de l'électricité fasse équilibre à la torsion du fil qui tend à ramener la balle B à sa position primitive.

Or, il résulte des lois de l'élasticité que, dans la balance de torsion, l'effort nécessaire pour tenir le corps suspendu en équilibre dans une position donnée est proportionnel à l'angle de torsion du fil suspenseur. De plus, dans les recherches relatives à la mesure des forces électriques, l'écartement angulaire des deux corps électrisés est toujours assez faible pour que l'arc de cercle qui mesure la déviation de l'aiguille horizontale de gomme laque se confonde sensiblement avec sa corde et sa tan-

gente. Dès lors, cet arc peut servir de mesure à la distance qui sépare les deux balles électrisées, et la force répulsive est directement opposée à la force de torsion (1).

Influence de la distance. — Coulomb a étudié, avec beaucoup de soin, l'influence de la distance qui sépare deux quantités invariables d'électricité de même nom sur leur répulsion mutuelle. A cet effet, il déterminait les angles de torsion qu'il est nécessaire d'imprimer au fil suspenseur de la balance pour maintenir la balle mobile B dans diverses positions d'écartement angulaire par rapport à la balle fixe A, après les avoir chargées de fluide de même nom. Dans une de ses expériences :

La balle mobile B étant au repos en face du zéro de l'échelle RR', il mit en place la balle fixe A électrisée. Immédiatement la balle mobile se chargea d'une partie de l'électricité de la balle A, fut repoussée et s'arrêta à 36° de déviation angulaire. Il en résulte qu'à 36° de distance, la répulsion de l'électricité faisait équilibre à une torsion de 36°.

Puis il mit en mouvement le tambour MM' de manière à augmenter la torsion du fil; la balle mobile B se rapprocha de la balle fixe A. Quand le tambour MM' eut décrit un angle de 126°, la balle mobile B s'arrêta et se maintint à 18° d'écartement angulaire de la balle fixe A. Dans cette seconde position, la répulsion s'exerçait à 18° de distance, et faisait équilibre à une torsion de 126° + 18°, c'est-à-dire à une torsion de 144°.

(1) Pour la démonstration des principes sur lesquels repose l'emploi de la balance de torsion dans les recherches d'électricité statique, voir la note A à la fin de cette première section.

Coulomb continua à tordre le fil suspenseur à l'aide du tambour MM′ qu'il écarta de 567° de sa position primitive. La balle mobile B s'arrêta et se maintint à 9° d'écartement angulaire de la balle fixe A (1). Dans cette troisième position, la répulsion s'exerçait à 9° de distance, et faisait équilibre à une torsion de 567° + 9°, c'est-à-dire à une torsion de 576°.

Cette expérience montre que, quand les distances qui séparent deux corps chargés d'une quantité invariable de même fluide électrique sont entre elles comme les angles 36°, 18°, 9°, ou comme 1 est à 1/2, est à 1/4, la force répulsive augmente comme les angles de torsion 36°, 144°, 576°, c'est-à-dire comme les nombres 1, 4, 16.

Les intensités de la répulsion mutuelle de deux quantités invariables d'électricité de même nom sont donc en raison inverse des carrés des distances auxquelles cette répulsion s'exerce.

Le même procédé peut être employé pour chercher la loi des attractions électriques. Dans ce cas, on commence par placer la balle mobile B à une distance angulaire connue du zéro de l'échelle RR′; alors, on communique à la balle A du chargeur et à la balle mobile B des fluides de nature opposée et, à l'aide du tambour mobile MM′, on tord le fil de manière à contre-balancer l'attraction des deux électricités. On trouve ainsi que la loi des attractions est la même que celle des répulsions.

(1) Dans l'expérience de Coulomb, la distance angulaire d'équilibre n'était pas de 9°, mais de 8°,5; cette légère différence entre l'écart théorique et l'écart observé est évidemment un effet de la perte d'électricité éprouvée par l'air, et doit être négligée.

Pour étudier la loi des attractions, Coulomb a employé un autre moyen. A un fil de soie sans torsion C D, était suspendue (Fig. 10) une petite aiguille de gomme laque

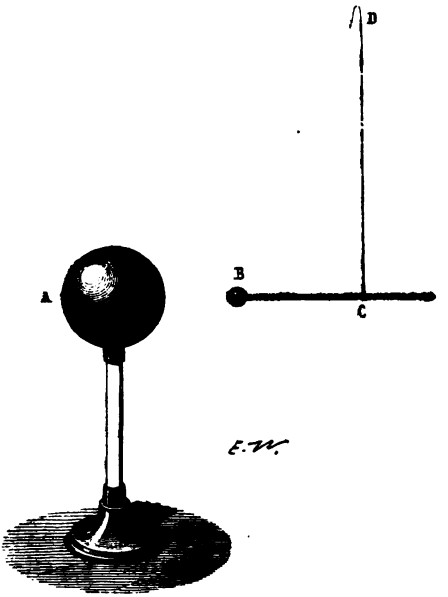


Fig. 10.

bien équilibrée et portant à son extrémité une petite balle dorée de moelle de sureau B. La distance du point C au centre de la balle de sureau B était d'environ 38 millimètres. En face de cette aiguille il plaçait une sphère de bois doré isolée et de 33 centimètres de diamètre. La sphère A et la balle B étaient chargées de fluides contraires; la petite balle B étant alors écartée de sa position d'équilibre, y était ramenée par l'attraction de la sphère A,

et exécutait un certain nombre d'oscillations à droite et à gauche de cette position. L'aiguille C B représentait donc un pendule dont la longueur C B était invariable et dont C était le point de suspension. La force, sous l'influence de laquelle s'exécutaient les oscillations, était l'attraction électrique agissant elle-même à une distance mesurée par l'intervalle qui séparait le centre de la sphère A du centre de la petite balle B; tout devait donc se passer conformément aux lois bien connues du pendule.

Coulomb fit varier la distance du centre de la sphère A au centre de la petite balle B, et mesura, dans chaque position, le temps nécessaire pour que le petit pendule C B exécutât une oscillation. Il trouva ainsi que la durée d'une oscillation augmentait dans le même rapport que la distance du centre de la sphère A au centre de la petite balle B. Ce résultat démontre que :

Les intensités de l'attraction mutuelle de deux quantités invariables d'électricité sont aussi en raison inverse des carrés des distances auxquelles cette attraction s'exerce.

Influence des charges électriques. — Les expériences précédentes donnent la loi que suivent les attractions et les répulsions de deux quantités invariables d'électricité quand la distance qui sépare les corps électrisés change, mais elles ne fournissent aucune notion sur l'effet produit par les variations des charges électriques employées. Pour déterminer ce dernier élément de la question, il faudrait avoir un moyen de diminuer la charge électrique de l'un des corps ou de chacun des corps en présence dans des proportions déterminées. Or, il est évident que si l'on touche une sphère électrisée avec une sphère isolée, à

l'état neutre, de même substance et de même diamètre, à cause de la parfaite similitude des deux corps, l'électricité se répandra en quantités égales sur les deux sphères. Après leur séparation, chacune d'elles ne possédera donc que la moitié de la charge initiale de la sphère primitivement électrisée.

Cela posé, chargeons d'électricité de même espèce la balle mobile B et la balle fixe A de la balance de torsion (Fig. 9), puis introduisons la balle A du chargeur dans la cage de verre. Ces deux balles se repoussent mutuellement; soient :

E, la charge électrique initiale de la balle du chargeur A ;

E′, la charge électrique initiale de la balle mobile B ;

D, la distance angulaire qui sépare la balle B de la balle A ;

T, la torsion qu'éprouve le fil suspenseur, quand la balle mobile B occupe cette position ;

$E \times E'$ sera le produit des deux charges initiales.

Si nous touchons la sphère A avec une sphère isolée de même nature et de même diamètre, évidemment la charge électrique de A ne sera plus que $\frac{E}{2}$, et, celle de B étant restée égale à E′, le produit des deux charges électriques deviendra $\frac{E \times E'}{2}$. Or, l'expérience prouve que, dans ce cas, pour maintenir B à la même distance angulaire D de la sphère fixe A, la torsion du fil suspenseur doit être réduite à $\frac{T}{2}$.

Les choses étant ainsi disposées, touchons la sphère B avec une sphère isolée de même diamètre et de même nature ; la charge électrique de B ne sera plus que $\frac{E'}{2}$, et le produit des deux charges en présence sera $\frac{E \times E'}{4}$. Dans ce cas, pour maintenir B à la même distance D de la sphère A, l'expérience prouve que la torsion du fil suspenseur doit être réduite à $\frac{T}{4}$.

Puisque, dans la balance de Coulomb, les intensités des actions électriques sont proportionnelles aux torsions imprimées au fil suspenseur, il résulte de ces observations que :

Les intensités de l'action totale attractive ou répulsive de deux corps électrisés placés à une distance invariable, sont proportionnelles aux produits de leurs charges électriques.

Cela posé, prenons pour *unité* de force attractive ou répulsive, l'action qu'exercent l'un sur l'autre deux corps électrisés, placés à l'*unité* de distance et possédant chacun l'*unité* de charge électrique. Si nous représentons par E et E' les charges de ces deux corps placés en présence, il résulte des lois précédemment établies que :

1° Dans le cas où les deux corps seront à l'*unité* de distance, leur action totale attractive ou répulsive aura pour valeur :

$$F = E \times E'.$$

2° Dans le cas où les deux corps seront à une di-

stance D, leur action totale attractive ou répulsive deviendra :

$$F' = \frac{F}{D^2} = \frac{E \times E'}{D^2}.$$

Il découle immédiatement de cette dernière expression de l'action totale de deux corps électrisés en présence que, la distance D et l'une des deux charges restant invariables, les valeurs successives de l'autre charge sont exactement proportionnelles aux intensités de la force F'. D'ailleurs, dans chaque épreuve, l'intensité de la force F' est mesurée par la torsion qu'il faut imprimer au fil suspenseur pour lui faire équilibre, c'est-à-dire pour maintenir la balle mobile B de la balance de Coulomb à une distance invariable D de la balle fixe A.

L'exactitude des lois précédentes, déduites par Coulomb de ses expériences, a été contestée par M. Harris. Ce savant, opérant avec un appareil de son invention nommé *balance Bifile*, est arrivé à des résultats différents de ceux de Coulomb, lorsque les corps électrisés étaient placés à une distance angulaire inférieure à 9°, quand leurs charges électriques étaient faibles, et surtout quand la charge de l'un était très différente de celle de l'autre. Dans les expériences de M. Harris, en raison même de la différence des charges électriques employées et de la faible distance à laquelle les effets étaient observés, l'état électrique des corps en présence devait être profondément modifié par l'*influence* que tout corps électrisé exerce sur les corps voisins. Ajoutons enfin que M. Marié Davy a repris l'étude des lois des actions électriques. Il a établi dans ses recherches que les observations de Coulomb

relatives à l'action réciproque des corps électrisés placés à des distances *invariables* sont parfaitement exactes, et que la loi des distances est vraie pour des sphères dont la distance dépasse neuf à dix fois leur rayon. Cette dernière observation, jointe à beaucoup d'autres résultats obtenus par M. Marié Davy, prouve que les lois énoncées par Coulomb sont rigoureusement vraies pour des corps sphériques de très faible étendue et doivent, par conséquent, être considérées comme les *lois élémentaires* des attractions et des répulsions électriques.

Pertes éprouvées par la charge électrique. — Il n'y a pas de corps qui soit un *isolant parfait*. Lorsqu'on touche un conducteur électrisé avec un cylindre isolant, on constate, après la séparation, que l'électricité s'est propagée, sur la surface du corps mauvais conducteur, à une distance du point de contact variable avec la nature de la substance employée. Les supports isolants, sur lesquels s'appuient les conducteurs électrisés, doivent leur soutirer ainsi une certaine proportion de fluide, et, dans les cas où ils sont assez courts pour s'électriser dans toute leur longueur, ils doivent permettre l'établissement d'un flux plus ou moins lent de fluide dirigé du conducteur vers le sol. La gomme laque et la cire d'Espagne sont les corps qui livrent le plus difficilement passage à l'électricité. Le verre, les cheveux et la soie sont des isolants de très médiocre qualité, parce qu'ils jouissent de la propriété de condenser à leur surface la vapeur d'eau de l'atmosphère. Quand on veut se servir de ces substances pour isoler des conducteurs électrisés, il faut avoir

soin de les enduire d'une couche de gomme laque ou de cire d'Espagne.

L'air, même parfaitement sec, enlève aux corps électrisés une portion du fluide accumulé à leur surface. Les couches gazeuses qui enveloppent immédiatement un corps électrisé, s'électrisent elles-mêmes à ses dépens par voie de contact. Dès qu'elles sont chargées de fluide, elles sont repoussées et cèdent la place à de nouvelles couches qui, à leur tour, empruntent à ce corps une nouvelle dose d'électricité qu'elles emportent avec elles en s'éloignant. Cette perte inévitable et incessante produit un affaiblissement progressif des charges électriques dont la rapidité croît, du reste, avec l'état hygrométrique de l'atmosphère.

Coulomb a fait une très belle étude des lois que suivent les pertes d'électricité par les supports et par l'air. A l'aide de ces lois, il est possible de calculer l'affaiblissement qu'éprouvent les charges électriques dans le cours d'une même série d'expériences, et de faire subir aux résultats observés les corrections nécessaires pour se mettre à l'abri de cette cause d'erreur dans les recherches sur la mesure des forces électriques.

1° *Pertes par les supports.* — Il résulte des expériences de Coulomb que, quand de petites sphères électrisées sont isolées à l'aide d'aiguilles de gomme laque, la perte d'électricité est d'autant plus faible que l'aiguille est plus longue; mais que, passé une certaine longueur variable avec l'intensité de la charge, cette perte d'électricité reste constante. Ce fait prouve qu'on peut, dans chaque opération particulière, donner à l'aiguille de gomme laque

assez de longueur pour que la déperdition du fluide électrique soit bornée à celle qu'entraîne nécessairement le contact de l'air. Coulomb a montré que *cette longueur limite*, nécessaire pour annuler la perte d'électricité par les supports, doit *varier proportionnellement au carré de la charge du corps qu'on se propose d'isoler*.

2° *Pertes par l'air.* — La perte d'électricité due au contact de l'air ne peut pas être annulée; mais Coulomb a démontré que, les circonstances extérieures d'agitation, de température et d'état hygrométrique de l'atmosphère restant les mêmes, *le rapport de l'intensité de la charge électrique à l'affaiblissement qu'elle éprouve dans un temps très court est une quantité constante.* Cette loi très simple permet, dans chaque série d'observations, de tenir compte de cette cause d'erreur inévitable, et de donner aux résultats obtenus toute la rigueur désirable. En effet, si, dans des conditions atmosphériques données, on détermine une seule fois le rapport de l'intensité de la charge à l'affaiblissement qu'elle éprouve dans un temps très court, ce rapport, étant le même pour toutes les charges possibles, pourra servir à corriger toutes les expériences exécutées dans les mêmes circonstances extérieures. Dans les recherches de Coulomb, l'air contenait toujours une certaine proportion de vapeur d'eau; de nouvelles expériences étaient nécessaires pour savoir si la loi précédente se vérifierait encore dans le cas où les gaz seraient parfaitement desséchés. M. Matteucci (1) a publié sur ce sujet un travail important dont nous ne ferons que citer ici les principaux résultats.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1850, t. XXVIII, p. 385.

1° A la même température et sous la même pression extérieure, les pertes d'électricité sont les mêmes dans l'*air*, l'*hydrogène*, l'*acide carbonique*, quand ces gaz sont parfaitement desséchés.

2° La perte dans l'air et les gaz secs est indépendante de la nature du corps électrisé; elle est la même pour les corps conducteurs et pour les corps isolants.

3° Dans les gaz secs, avec des charges ordinaires, la perte est la même pour l'électricité positive et pour l'électricité négative; mais, avec des charges fortes, la perte est plus considérable pour l'électricité négative que pour la positive.

4° Sous la même pression, la perte d'électricité dans l'air sec augmente avec la température de ce gaz.

5° Sous la même pression et à la même température, la perte d'électricité dans l'air augmente avec la quantité de vapeur d'eau qu'il contient.

6° Dans l'air et dans les gaz parfaitement *desséchés*, la perte d'électricité ne suit pas la loi de Coulomb que nous avons rapportée plus haut. Pour des charges comprises *dans certaines limites d'intensité*, la perte est *indépendante* de la quantité d'électricité accumulée, en sorte que, dans des temps égaux, la charge éprouve des affaiblissements successifs qui sont égaux.

7° A l'air libre, la perte d'électricité, au lieu d'augmenter avec l'agitation du gaz, diminue au contraire à mesure que la vitesse du courant d'air devient plus considérable. Ce dernier résultat dépend de la difficulté qu'éprouvent les molécules d'air à prendre l'électricité des corps avec lesquels elles sont en contact. Il faut tou-

jour un certain temps pour que les molécules gazeuses attirées par le corps électrisé se chargent à ses dépens et soient ensuite repoussées; quand le courant d'air est rapide, les molécules sont entraînées avant que cette communication d'électricité soit achevée, et la perte diminue.

ARTICLE II.

MODE DE DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ SUR LES CORPS CONDUCTEURS.

En appliquant le calcul à l'hypothèse de l'existence de deux fluides électriques repoussant leurs propres molécules, et s'attirant mutuellement en raison inverse du carré des distances, Poisson (1) a résolu toutes les questions relatives à la distribution de l'électricité répandue dans les corps conducteurs dont la forme est susceptible d'une définition simple et rigoureuse. Le cadre de notre travail ne nous permet pas d'entrer dans les détails de cette savante analyse; nous devons nous contenter d'exposer les résultats fournis par l'observation directe et de signaler, chemin faisant, l'accord remarquable qui existe entre les conséquences auxquelles Poisson est arrivé et les lois que Coulomb avait déjà déduites de ses expériences.

L'électricité est localisée à la surface des corps. — Une sphère métallique pleine A étant chargée d'électricité, si on la touche avec une seconde sphère B pleine, isolée,

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1811, 1re partie, p. 1, 2e partie, p. 163.

à l'état naturel, de même métal et de même rayon, tout étant symétrique de part et d'autre, la charge électrique doit évidemment se partager également entre les deux sphères. Que la sphère B soit pleine ou creuse, quelle que soit sa nature, pourvu qu'elle soit conductrice et de même surface que la sphère A, la balance de torsion fournit le moyen de prouver que le résultat est toujours le même et qu'après le contact, chacune des deux sphères possède la moitié de la charge initiale de la sphère A. Puisque la quantité d'électricité dont un conducteur se charge dans une circonstance donnée est indépendante de sa nature et de sa masse, et se trouve uniquement réglée par son volume, nous sommes en droit de penser que le

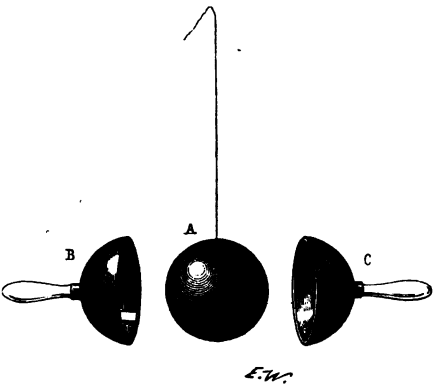


Fig. 11.

fluide libre se porte tout entier à la surface du corps. Cette propriété remarquable de l'électricité statique peut être vérifiée par des expériences directes.

Soit A (Fig. 11) une sphère métallique électrisée et

suspendue à un fil isolant de soie enduit d'une couche de gomme laque; soient, en outre, B et C deux hémisphères creux métalliques, dont la capacité intérieure est égale à la surface de la sphère A. Ces hémisphères étant à l'état naturel, on les prend par des manches isolants, on les applique sur la sphère A de manière à la recouvrir entièrement, et on les enlève. Après la séparation, on trouve que la sphère a perdu toute réaction électrique, tandis que les hémisphères ont acquis la propriété d'attirer les corps légers, et ont emporté avec eux tout le fluide libre.

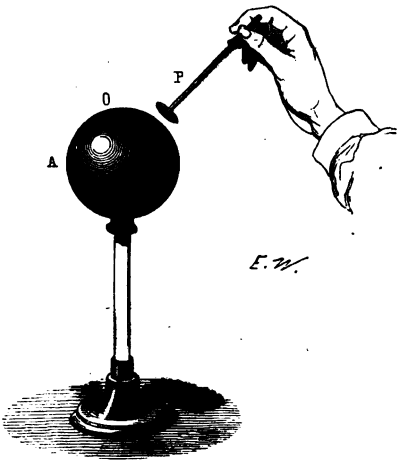


Fig. 12.

Soit maintenant (Fig. 12) une sphère métallique creuse A, électrisée et portée sur un pied isolant; soit P un disque de papier doré, fixé à un manche isolant et assez petit pour s'appliquer exactement sur la surface du corps

observé. Ce petit disque prend le nom de *plan d'épreuve*. Sur un point quelconque de la *surface extérieure* de cette sphère, on applique le plan d'épreuve P ; le disque emprunte de l'électricité à la sphère et attire les corps légers. Si, après avoir déchargé le disque, on l'introduit par l'ouverture O pour le mettre en contact avec un point de la *surface intérieure*, quelque mince que soit l'enveloppe métallique, le plan d'épreuve reste à l'état naturel, et ne donne aucune trace de réaction électrique quand on le présente à un corps léger après l'avoir retiré de la cavité de la sphère.

Fig. 13.

Ces deux expériences démontrent que l'électricité libre se localise à la *surface extérieure* des corps conducteurs.

M. Faraday a imaginé des appareils très élégants et très

ingénieux pour démontrer cette propriété remarquable de l'électricté. Sur un disque métallique isolé A (Fig. 13), on place un cylindre C de toile métallique ou composé d'un treillis de fil de fer à mailles très lâches, puis on communique de l'électricité au disque conducteur. A l'aide du plan d'épreuve, il est facile de s'assurer que le fluide s'est répandu sur toute la *surface extérieure* du cylindre C, tandis que sa *surface intérieure* est restée à l'état naturel.

A un anneau métallique A (Fig. 14) porté sur un pied

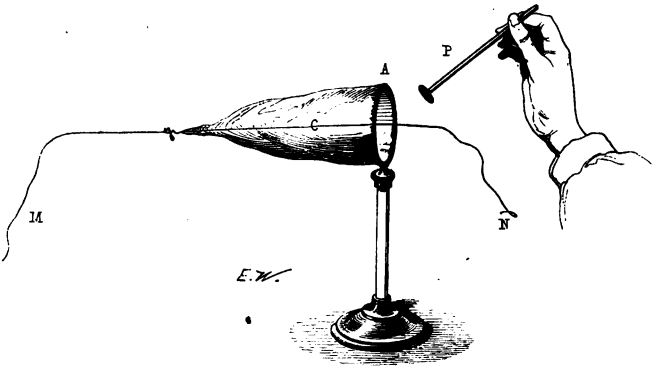


Fig. 14.

isolant, on fixe un sac conique de mousseline C, puis on électrise l'anneau. Le disque P sert à démontrer que le sac de mousseline est électrisé sur toute la *surface extérieure*, tandis que la *surface intérieure* reste à l'état naturel. Si, à l'aide du fil de soie M N fixé à l'extrémité du cône, on retourne la coiffe, l'électricité se déplace et passe d'une surface à l'autre, de manière à rester toujours localisée à l'*extérieur*.

De la couche électrique et de sa tension.—Des faits précédents, il résulte naturellement que l'électricité libre existe, sur les conducteurs, à l'état de couche mince dont la surface extérieure se confond avec celle des corps eux-mêmes qui lui servent de support. L'épaisseur de la couche électrique doit, dans tous les cas, être excessivement faible, car le fluide libre n'envahit jamais la surface intérieure d'une sphère creuse quelque minces que soient ses parois, et l'expérience démontre que son mode de distribution n'est pas influencé par les variations d'épaisseur des corps électrisés. Quand la quantité absolue d'électricité libre accumulée sur un corps augmente, il peut arriver deux choses : ou bien la densité du fluide reste la même et la couche devient plus épaisse, ou bien l'épaisseur de la couche du fluide ne change pas et sa densité devient plus considérable. L'expérience et le calcul sont également insuffisants pour trancher cette question. Cependant il est probable que, dans ce cas, l'épaisseur de la couche augmente réellement. En effet, sa *surface extérieure* se trouve naturellement limitée par celle du corps qu'elle ne peut dépasser, mais il serait difficile de donner une raison valable pour assigner à sa *surface intérieure* une position déterminée et invariable dans l'épaisseur du conducteur. Les conditions d'équilibre du fluide libre ne s'opposent nullement à ce que l'épaisseur de la couche qu'il occupe augmente en même temps par sa quantité. Du reste, comme, dans tous les cas, l'épaisseur de la couche électrique doit être plus petite que toute quantité physiquement appréciable, on peut à volonté adopter l'une ou l'autre des deux manières

d'expliquer l'accroissement de quantité du fluide libre; le choix n'entraîne qu'un simple changement de langage et ne peut, en aucune façon, influer sur l'interprétation des faits observés.

La quantité absolue d'électricité accumulée à la surface d'un conducteur de volume donné, ou *la charge électrique de ce conducteur*, est donc proportionnelle à l'épaisseur de la couche que le fluide libre occupe. Cette couche est elle-même composée de molécules électriques homogènes qui se repoussent mutuellement en raison inverse des carrés des distances. Pour que cette couche électrique reste en équilibre à la surface d'un corps, le calcul démontre que la condition suivante est nécessaire et suffisante : *la forme de la couche électrique doit être telle que la somme des actions du fluide libre sur un point placé dans l'intérieur du corps soit nulle.* Nous verrons en effet, dans le chapitre suivant, que, si cette condition n'était pas satisfaite pour un point quelconque situé dans l'intérieur du corps, le fluide neutre de ce point serait décomposé par *induction*, et l'équilibre serait nécessairement troublé par cette nouvelle distribution de l'électricité.

On appelle *tension* d'une portion de la surface d'un corps électrisé, l'action attractive ou répulsive que cette portion de surface exerce sur un corps électrisé situé en dehors d'elle. Les expériences de Coulomb, rapportées dans l'article précédent, s'accordent avec le calcul pour démontrer que cette action est directement proportionnelle à l'épaisseur de la couche électrique sur cette portion de la surface. Ces deux expressions, *tension électrique* et *épaisseur de la couche électrique*, représentent donc

des quantités exactement proportionnelles; nous nous en servirons indistinctement pour caractériser l'*état électrique* de la surface entière ou d'une partie déterminée de la surface d'un conducteur quelconque. Et, en même temps, pour spécifier la nature du fluide libre accumulé, ou plus généralement le sens dans lequel agit la force électrique soumise à l'observation, nous dirons que la *tension* est *positive* ou *négative* suivant que la charge du corps sera elle-même positive ou négative. Cette expression de *tension* a d'ailleurs le grand avantage de traduire nettement le fait de l'action exercée par un corps électrisé sur les corps environnants, et d'être indépendante de toute hypothèse sur la nature des forces électriques.

Influence de la forme des conducteurs sur le mode de distribution de l'électricité à leur surface. — Il résulte des notions précédentes que la tension électrique d'un point quelconque, pris à la surface d'un conducteur, est proportionnelle à son action sur un point extérieur placé à une distance invariable et possédant une charge constante d'électricité. Les rapports des actions électriques des divers éléments de la surface d'un conducteur sont donc les mêmes que ceux des épaisseurs correspondantes de la couche de fluide libre. Par conséquent, toute méthode qui pourra servir à mesurer les premiers nous fournira directement les seconds, et nous permettra de déterminer expérimentalement les lois de la distribution de l'électricité à la surface d'un conducteur de forme quelconque.

Les mémoires déjà cités de Coulomb contiennent les résultats de ses belles recherches sur cette question importante d'électricité statique; l'appareil employé pour

mesurer l'action électrique est la balance de torsion, décrite page 18, dans laquelle la balle mobile B a été remplacée par un *petit disque* de papier doré placé verticalement. Soit C (Fig. 15) un conducteur quelconque

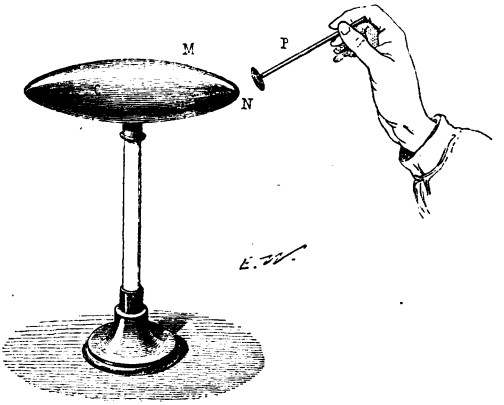


Fig. 15.

électrisé et isolé; on le touche au point M, avec un *plan d'épreuve* P assez petit pour s'appliquer exactement, par toute son étendue, sur l'élément correspondant de sa surface. Le plan d'épreuve s'électrise aux dépens du corps ; Coulomb admet que, au moment de la séparation, il emporte avec lui une quantité de fluide qui est une fraction constante de la charge que l'élément touché possédait avant l'opération. Ce principe est la base de la méthode proposée par Coulomb, il en a vérifié l'exactitude à l'aide des deux expériences suivantes:

Le corps C étant isolé et électrisé (Fig. 15), on le touche au point M avec le plan d'épreuve P, qu'on porte ensuite

rapidement (1) dans la balance électrique (Fig. 9); on mesure la torsion qu'il faut imprimer au fil pour maintenir le disque mobile B, préalablement chargé de la même électricité que le corps C, à une distance fixe du plan d'épreuve. On retire le plan d'épreuve, on le décharge, et l'on touche le corps C avec un conducteur isolé de même forme et de même surface. Le corps C perd ainsi la moitié de son fluide libre; par conséquent, la couche d'électricité n'a plus au point M que la moitié de son épaisseur primitive. Si alors on applique de nouveau le plan d'épreuve sur le point M, et si on l'oppose au disque mobile de la balance dont la charge est restée constante, l'expérience démontre que, pour maintenir ces deux disques à la même distance, le fil suspenseur ne doit conserver que la moitié de la torsion qu'il avait dans la première épreuve.

Tout étant disposé comme dans l'expérience précédente, appliquons successivement le plan d'épreuve P sur le point M et sur le point N du corps C; mesurons, dans chaque cas, le degré de torsion qu'il faut imprimer au fil suspenseur de la balance pour maintenir le disque mobile à une distance fixe du plan d'épreuve. Laissons le corps C abandonné à lui-même pendant un certain temps; une partie de sa charge électrique s'écoulera à travers l'atmosphère, mais la couche électrique conservera évidemment la même forme et, quoique la couche soit partout amincie, le rapport de ses épaisseurs en M

(1) Dans cette opération, le plan d'épreuve, placé dans une position verticale, est substitué à la balle fixe A et joue le même rôle que cette balle.

et en N restera exactement le même. Recommençons l'opération; appliquons de nouveau successivement le plan d'épreuve sur le corps en M et en N et déterminons, à l'aide de la balance, les torsions nécessaires pour retenir le disque mobile à la même distance du plan d'épreuve. L'expérience démontre que le rapport de ces deux dernières torsions est le même que celui des deux torsions fournies par la première observation.

La tension primitive d'un élément quelconque d'une surface électrisée et celle que le plan d'épreuve lui emprunte sont donc dans un rapport constant. Par suite, les répulsions du plan d'épreuve sont exactement proportionnelles à celles des divers éléments de la surface électrisée avec lesquels il est mis en contact, et les rapports des torsions qui mesurent les intensités de ces répulsions représentent eux-mêmes les rapports des épaisseurs correspondantes de la couche électrique. En mesurant ainsi la répulsion que le plan d'épreuve, mis successivement en contact avec les divers éléments de la surface d'un corps conducteur quelconque électrisé, exerce sur le disque mobile de la balance de torsion maintenu à une distance invariable, il est possible de déterminer, dans chaque cas particulier, le mode de distribution qu'affecte le fluide libre.

Coulomb a imaginé un moyen très simple de rendre les résultats directement comparables, et indépendants des pertes incessantes d'électricité dues au contact de l'air. Supposons qu'il s'agisse de déterminer le rapport des épaisseurs de la couche électrique aux points M et N de la surface d'un corps quelconque C électrisé et isolé

(Fig. 15). On fait successivement trois épreuves dans l'ordre suivant :

Première épreuve. — Le plan d'épreuve est appliqué au point M, on le porte dans la balance; soit E la torsion du fil suspenseur nécessaire pour retenir le disque mobile préalablement électrisé à une distance invariable du plan d'épreuve.

Deuxième épreuve. — Le plan d'épreuve est appliqué au point N, on le porte dans la balance; soit E′ la torsion du fil suspenseur nécessaire pour retenir le disque mobile à la même distance.

Troisième épreuve. — Le plan d'épreuve est de nouveau appliqué au point M, on le porte dans la balance; soit e, plus petit que E, la torsion du fil suspenseur nécessaire pour retenir le disque mobile à la même distance.

Le temps écoulé entre deux épreuves successives étant le même, il résulte de la loi des pertes par l'air (page 30) que la moyenne, $\frac{E + e}{2}$, des résultats fournis par la première et la troisième détermination, représente exactement la torsion qu'il aurait fallu imprimer au fil suspenseur pour maintenir le disque mobile en équilibre, si le plan d'épreuve avait été appliqué au point M au moment même où il a été mis en contact avec le point N. Par conséquent, les épaisseurs de la couche de fluide libre correspondantes aux éléments M et N de la surface électrisée sont rigoureusement dans le rapport des quantités $\frac{E + e}{2}$ et E′. En procédant ainsi, Coulomb a déterminé expérimentalement le mode de distribution

de l'électricité sur des conducteurs de formes très différentes; ses résultats sont parfaitement d'accord avec ceux que Poisson a déduits du calcul. Il nous paraît utile de rapporter ici quelques-unes des déterminations expérimentales de Coulomb.

Sphère. Quel que soit le point touché de la surface d'une sphère isolée et électrisée, il faut imprimer la même torsion au fil suspenseur de la balance pour maintenir le disque mobile à une distance invariable du plan d'épreuve. On conclut de là que, sur une sphère, l'épaisseur de la couche électrique est uniforme et la tension du fluide est la même en tous les points de la surface. La parfaite symétrie de la surface de la sphère permettait de prévoir ce résultat fourni par l'expérience.

Ellipsoïde de révolution. Sur un ellipsoïde de révolution, l'expérience et le calcul montrent que, aux extrémités des axes de l'ellipse méridienne, les épaisseurs de la couche électrique ou les tensions sont dans le rapport de ces axes.

Cylindres. Sur un cylindre de 812 millimètres de longueur sur 54 millimètres de diamètre et terminé par deux demi-sphères, les tensions électriques, très faibles vers le milieu de la longueur, croissent rapidement vers les extrémités; les épaisseurs de la couche électrique varient dans les rapports suivants :

	Épaisseur de la couche électrique.
Au milieu de la longueur.	1
A 54 millimètres de l'extrémité. . .	1,25
A 27 millimètres de l'extrémité. . .	1,80
A l'extrémité.	2,30

Plaques rectangulaires. — Sur une plaque rectangulaire de 298 millimètres de longueur sur 27 millimètres de largeur, les épaisseurs de la couche électrique ou les tensions varient dans les rapports suivants :

	Épaisseur de la couche électrique.
Au milieu de la longueur.	1
A 27 millimètres de l'extrémité. . .	1,20
A l'extrémité.	2,02

Plaques circulaires. — Sur une plaque circulaire de 271 millimètres de diamètre, les épaisseurs de la couche électrique ou les tensions varient dans les rapports suivants :

	Épaisseur de la couche électrique.
Au centre	1
A 54 millimètres du bord.	1,17
A 27 millimètres du bord	1,50
A 14 millimètres du bord.	2,07
Au bord	2,90

Tous ces résultats s'accordent pour démontrer que, sur les conducteurs de forme allongée, l'électricité s'accumule surtout vers les extrémités de leur plus grande dimension, et que là le fluide libre atteint son *maximum* de tension.

Conducteurs coniques. — Le calcul indique que, au sommet d'un cône, la *tension* électrique devient infinie ; l'expérience confirme l'exactitude de ce résultat en montrant qu'il est impossible de maintenir un conducteur conique isolé dans un état électrique permanent. Ce fait

important nous servira plus tard à expliquer le rôle que jouent les pointes dans les phénomènes électriques. Nous verrons qu'un conducteur garni d'une pointe laisse échapper l'électricité à mesure qu'on cherche à l'accumuler à sa surface.

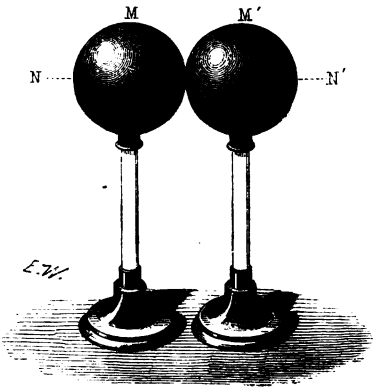


Fig. 16.

Sphères en contact. — Soient A et B (fig. 16) deux sphères *de même rayon* isolées et en contact; on charge le système d'électricité. L'expérience prouve que la réaction électrique ne devient sensible qu'à 20° du point de contact. L'épaisseur de la couche augmente rapidement de 20° à 60°, puis lentement de 60° à 90° et, enfin, reste la même des points M et M' aux extrémités N et N' du diamètre mené par le point de contact. Au moment de leur séparation, ces sphères emportent avec elles la même quantité d'électricité; le fluide se répand en couche uniforme à leur surface, quand elles sont assez éloignées pour ne pas s'influencer mutuellement.

Soient maintenant A et B (Fig. 17), deux sphères isolées, en contact et de *rayon inégal*. Si l'on électrise le système, le calcul et l'expérience s'accordent pour démontrer que l'épaisseur E′ de la couche électrique en N′ est plus con-

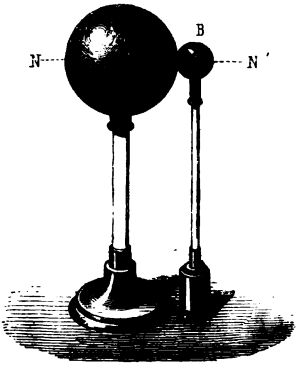


Fig. 17.

sidérable que son épaisseur E au point correspondant N de la surface de la grande sphère. Le rapport $\frac{E'}{E}$ augmente avec celui du rayon de la sphère A au rayon de la sphère B, se rapprochant indéfiniment du nombre 4 d'après Coulomb, et du nombre 4,2 d'après Poisson.

Quand on vient à séparer ces deux sphères, l'expérience et le calcul indiquent que l'électricité ne se partage pas entre elles proportionnellement à l'étendue de leurs surfaces. La charge de la petite sphère est proportionnellement plus forte que celle de la grande. En désignant par e' l'épaisseur de la couche uniforme qui couvre la petite sphère et par e l'épaisseur de la couche sur la

grande sphère, le rapport $\frac{e'}{e}$ augmente avec le rapport du rayon de la sphère A au rayon de la sphère B, se rapprochant indéfiniment du nombre 2 d'après Coulomb, et du nombre 1,65 d'après Poisson.

CHAPITRE II.

ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE OU PAR INDUCTION.

Ce n'est pas seulement par le frottement, ou par son contact avec une substance déjà chargée de fluide libre qu'un corps peut lui-même être électrisé. Un conducteur *isolé* à *l'état naturel* donne des signes évidents d'électrisation sur tous les points de sa surface, quand on le place en présence d'un corps électrisé dont il n'est séparé que par de l'air ou par un milieu *isolant* quelconque. Dans ce cas, on dit que l'électricité est développée à distance par *influence* ou par *induction*. Le corps primitivement électrisé qui exerce l'*influence* est appelé *corps inducteur;* on appelle *corps induit* le conducteur à l'état neutre sur lequel l'électricité est ainsi développée.

ARTICLE PREMIER.

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX D'INDUCTION ÉLECTRO-STATIQUE.

Prenons (Fig. 18) un cylindre métallique CB à l'état naturel, posé sur un pied isolant et muni d'une série de

doubles pendules formés de balles de sureau suspendues à des fils conducteurs de lin. Prenons en outre une sphère A isolée et chargée d'électricité positive, et rapprochons-la de l'extrémité B du cylindre. Quand la sphère et le cylindre ne

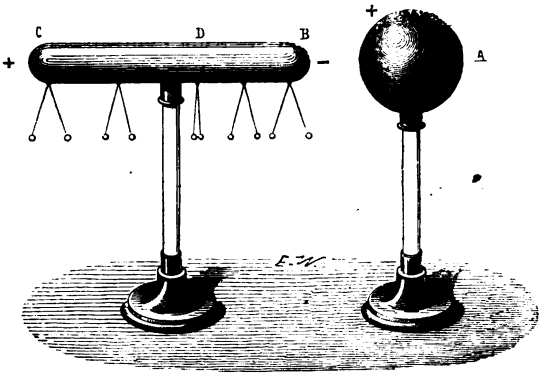


Fig. 18.

sont plus qu'à quelques centimètres de distance, les petits pendules se mettent à diverger. Le cylindre est donc électrisé dans toute son étendue, mais la charge n'est pas uniformément distribuée. L'écartement des pendules atteint son *maximum* aux deux extrémités B et C et, de là, diminue graduellement des deux côtés jusqu'à une section D, qui ne donne aucune réaction électrique, et que, pour cette raison, on appelle *ligne neutre*. Cette section *neutre* n'occupe jamais exactement le milieu du cylindre BC; elle est toujours située du côté de l'extrémité placée en face de la sphère A, et d'autant plus près de cette extrémité que la sphère *inductrice* est elle-même

plus fortement électrisée et plus rapprochée du conducteur *influencé*.

Si nous présentons à ce cylindre un petit pendule isolé et chargé d'électricité *positive*, ce pendule sera attiré par toute la portion du conducteur située entre la section *neutre* D et l'extrémité B; il sera au contraire repoussé par la partie comprise entre la section *neutre* D et l'extrétrémité C. Sous l'influence de la sphère A, le conducteur BC s'est donc chargé des deux électricités contraires. Ces deux fluides, séparés par une section *neutre*, sont distribués de telle façon que, la sphère *inductrice* étant *positive*, la partie du cylindre *induit* la plus rapprochée est *négative*, et la partie la plus éloignée est *positive*. La distribution des deux électricités sur le conducteur BC serait inverse si la sphère A était chargée de fluide *négatif*.

Il est facile de démontrer que, dans cette expérience, le cylindre n'a rien gagné ni perdu, et que son électrisation est un fait de pure *influence* exercée à distance par la sphère électrisée. En effet, si on écarte la sphère A avec précaution, on voit la divergence des pendules diminuer graduellement et puis cesser complétement quand la sphère est suffisamment éloignée. Le cylindre BC est alors retombé à son *état naturel*.

Ainsi, d'une part, en présence de la sphère électrisée, le cylindre conducteur contient à l'état de liberté les deux électricités de noms contraires; d'autre part, ces deux électricités libres sont en quantité convenable pour reconstituer le fluide *neutre* quand la sphère est assez éloignée pour ne plus s'opposer à leur combinaison. Ces deux circonstances rapprochées nous permettent de théoriser;

de la manière suivante, l'électrisation à distance ou par *induction*.

Toutes les fois qu'un corps électrisé est rapproché d'un corps conducteur isolé à l'état naturel, le fluide libre du premier décompose par *induction* le fluide neutre du second, attire et retient l'électricité de nom contraire sur les parties du corps *induit* les plus rapprochées, et repousse l'électricité de même nom sur les parties les plus éloignées. L'*induction* a donc pour effet constant de partager un conducteur isolé en deux parties chargées de fluides de noms contraires. Ces deux portions du même corps peuvent être considérées comme des *pôles* de nature opposée ; nous dirons, dans ce sens, que l'*induction* a la propriété de *polariser* les conducteurs isolés.

Un cylindre électrisé par *induction* peut, à son tour, réagir de la même manière sur un conducteur isolé mis en présence d'une de ses extrémités et le *polariser*. Ainsi, plaçons à la suite les uns des autres (Fig. 19)

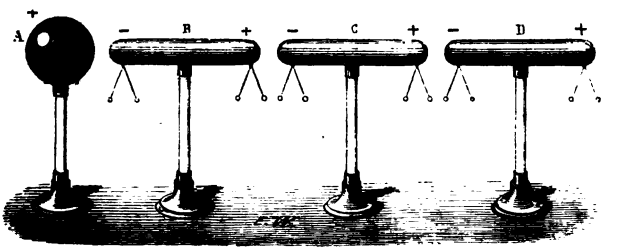


Fig. 19.

une série de conducteurs B, C, D, isolés, à l'état nature et munis de doubles pendules de moelle de sureau. Si du cylindre B nous approchons une sphère A isolée

et chargée d'électricité positive, immédiatement tous les pendules divergeront et tous les cylindres seront électrisés. Chacun d'eux sera *polarisé*, et contiendra les deux espèces d'électricité distribuées de telle manière que les deux extrémités opposées de deux cylindres successifs soient chargées de fluides contraires. Ces faits indiquent évidemment que, au moment où la sphère A s'est trouvée suffisamment rapprochée pour décomposer, par *induction*, le fluide *neutre* du cylindre B, ce premier conducteur, par son extrémité *positive*, a agi de la même manière sur le cylindre C, et l'extrémité *positive* du second conducteur a, à son tour, électrisé par *induction* le troisième cylindre D. D'ailleurs, il suffit d'éloigner la sphère A, ou de la décharger en la mettant en communication avec le sol, pour faire disparaître toute trace de *polarisation* à la surface des conducteurs; dans ce cas, en effet, la divergence des pendules cesse et tous les cylindres retombent instantanément à l'état naturel.

Pendant que le cylindre BC, placé en présence de la sphère A électrisée positivement, est lui-même électrisé par induction comme nous l'avons vu précédemment, supposons (Fig. 20) que, à l'aide d'un conducteur D, on mette son extrémité C en communication avec le sol. Alors, immédiatement, tout signe d'électrisation positive disparaît en C et les pendules de cette partie du cylindre cessent de diverger. Dans la partie B, au contraire, la réaction électrique reste toujours *négative*, elle devient même plus considérable et les pendules prennent un nouveau degré d'écartement. Pendant que la sphère A continue à exercer son influence, supprimons

le conducteur D; le cylindre BC étant ainsi isolé de nouveau, écartons la sphère A ou déchargeons-la de son

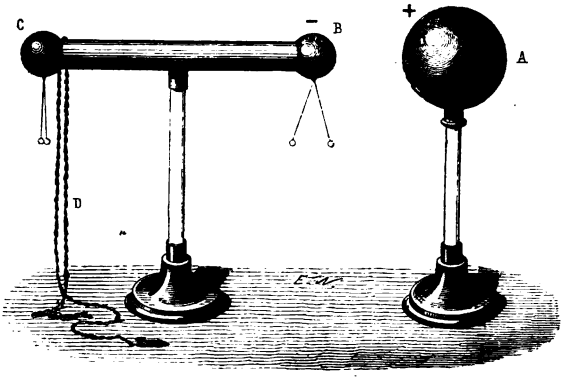


Fig. 20.

électricité en la mettant en communication avec le sol. Le cylindre BC, au lieu de retomber à l'état naturel,

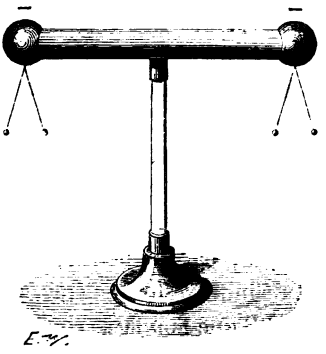


Fig. 21.

reste chargé d'électricité *négative* qui se répand librement sur toute sa surface (fig. 21) et fait diverger les pendules

d'une extrémité à l'autre. Les phénomènes qui caractérisent les phases successives de cette expérience sont faciles à comprendre.

Quand le cylindre *isolé* a été placé en présence de la sphère positive, son fluide *neutre* a été décomposé par induction, l'électricité *positive* a été refoulée en C et la *négative* a été attirée en B. Au moment où l'extrémité C a été mise en communication avec le sol, l'électricité *positive*, refoulée par l'influence de la sphère, s'est écoulée dans la terre et une nouvelle proportion de fluide *neutre* a été décomposée. Le fluide *positif* provenant de cette nouvelle décomposition s'est perdu dans le sol, et le fluide négatif est venu s'ajouter à celui qui était déjà retenu en B par l'action de la sphère A. Enfin, la communication avec le sol étant supprimée, la sphère A a été éloignée ou déchargée; alors, l'électricité *négative*, n'étant plus retenue en B, s'est librement répandue à la suface du conducteur isolé et le cylindre s'est trouvé électrisé *négativement* dans toute son étendue. Cette action à distance ou par induction est surtout mise à profit pour communiquer à un conducteur *isolé* une charge de nature connue.

Pour rendre l'exposition plus facile, nous avons supposé que le cylindre BC (Fig. 20) était mis en communication avec la terre par son *pôle positif*, c'est-à-dire par son extrémité C chargée, par induction, d'électricité positive. Le résultat définitif reste le même, quel que soit le point du cylindre BC que l'on fasse communiquer avec le sol dans l'expérience précédente. En effet, dans ce cas, la terre, la chaîne de communication et le cylindre doivent être considérés comme ne faisant qu'un même conducteur

soumis à l'influence de la sphère A. L'électricité *positive* fournie par le fluide *neutre* décomposé se perdra toujours dans le sol, et la *négative* se transportera sur les points du cylindre les plus rapprochés de la sphère A. Dès lors, après la suppression de la chaîne D de communication et l'éloignement de la sphère inductrice, le cylindre restera toujours chargé d'un excès d'électricité *négative*.

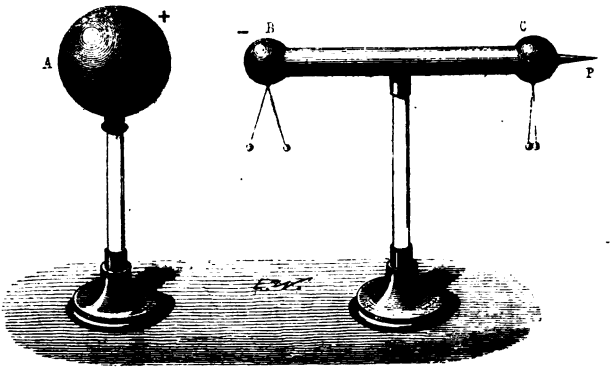


Fig. 22.

Au lieu de mettre l'extrémité C du cylindre *induit* en communication avec le sol à l'aide d'une chaîne métallique, contentons-nous de la terminer par une pointe P (Fig. 22). Dans ce cas, l'extrémité B placée en face de la sphère *inductrice* A se chargera d'électricité négative, et tout se passera comme à l'ordinaire dans cette partie du cylindre; mais, en C, il n'y aura pas de trace d'électricité positive, et les petits pendules de cette extrémité conserveront leur position verticale comme si elle avait été mise en communication avec le sol. A la surface du cylindre induit il n'y

aura donc qu'une espèce d'électricité, et cette charge sera de nature contraire à celle de la sphère inductrice A. Ce résultat est dû aux propriétés dont jouissent les pointes métalliques; la tension électrique développée par *induction* sur l'extrémité de la pointe P est assez forte pour que l'électricité positive, refoulée sur la moitié correspondante du cylindre, se dissipe dans l'atmosphère environnante.

Les expériences précédentes prouvent que l'électricité négative, attirée et retenue sur l'extrémité du cylindre *induit* la plus rapprochée de la sphère positive *inductrice*, conserve toutes ses propriétés même tant que dure l'influence de la sphère. Elle peut attirer et repousser les corps électrisés, elle peut même, comme l'a démontré M. Riess (1), passer de la surface du cylindre *induit* sur un autre corps conducteur. L'électricité attirée par *induction* à la surface des conducteurs conserve donc ses propriétés caractéristiques, et n'y est pas retenue, comme on l'admet généralement, à l'état de *fluide latent* ou *dissimulé*.

Entre une sphère A isolée chargée d'électricité positive, et une sphère B isolée à l'état neutre, plaçons un plateau métallique P isolé (Fig. 23). Par induction, le plateau P se chargera d'électricité négative sur la face qui regarde A, et d'électricité positive sur la face qui regarde B. L'électricité positive du plateau agira à son tour par influence sur la sphère B, et la polarisera ; cette dernière sphère, en effet, sera négative sur les parties de sa surface tournées ver le plateau P, et positive sur les parties

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1854, t. XLII, p. 373.

opposées. Les choses étant ainsi disposées, à l'aide de la chaîne C, mettons le plateau métallique en communication avec le sol (fig. 24); la face de ce plateau tour-

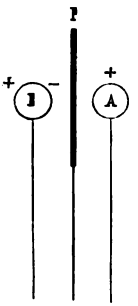


Fig. 23.

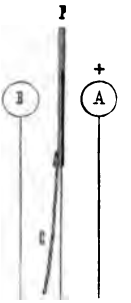


Fig. 24.

née vers la sphère A restera chargée d'électricité négative, la face opposée perdra toute son électricité positive et retombera à l'état neutre. L'expérience démontre en outre que, si le plateau P est *très large*, la sphère B reprendra instantanément son état neutre et ne conservera aucune trace d'électricité libre. Il résulte évidemment de ce fait que *l'induction ne s'exerce pas à travers les corps conducteurs en communication avec le sol.*

Il n'en est pas de même des corps isolants; l'expérience démontre que, quel que soit le corps isolant solide, liquide, ou gazeux, placé entre la sphère A et la sphère B, et quelles que soient ses dimensions transversales, l'induction s'exerce comme dans le cas où les deux sphères ne sont séparées que par une couche d'air. Pour rappeler cette différence observée entre les *conducteurs* et les *iso-*

lants, M. Faraday a imposé à ces derniers le nom de *corps diélectriques*. En même temps, il a fait une étude très importante du rôle joué par le *diélectrique* dans *l'induction*. Il a ainsi enrichi la science de résultats qui jettent un grand jour sur la théorie des phénomènes électriques ; mais avant d'aborder l'exposition de ces faits, il nous paraît nécessaire de décrire quelques appareils destinés les uns à accuser la présence de l'électricité libre, les autres à accumuler des charges électriques à la surface des *conducteurs*.

ARTICLE II.

ÉLECTROSCOPES.

On appelle électroscope tout appareil propre à accuser la présence de l'électricité et à déterminer la nature du fluide libre. Les instruments destinés à cet usage sont très nombreux ; leur construction est fondée sur la propriété, que possèdent les corps électrisés, de s'attirer ou de se repousser mutuellement suivant qu'ils sont chargés de fluides de noms contraires ou de fluides de même nom.

Pendule électrique. — Composé d'une balle de moelle de sureau suspendue à un fil de soie fixé lui-même à un pied isolant (Fig. 3, p. 8), le pendule électrique est le plus simple de tous les électroscopes. Quand la balle de sureau A est à l'état naturel, il suffit de lui présenter un corps quelconque pour savoir s'il est ou non électrisé. Dans le cas où le corps est électrisé, et dans ce cas seulement, la balle est attirée. Pour déterminer

l'espèce d'électricité dont est chargé le corps présenté au pendule, il faut préalablement charger la balle A *d'une électricité connue*. Si le fluide libre du corps est de même nature que celui de la balle, elle est repoussée ; dans le cas contraire elle est attirée.

Électroscope à cadran. — L'électroscope à cadran (Fig. 25) se compose d'un cylindre de bois T porté sur un pied métallique et muni, à sa partie supérieure, d'un cadran d'ivoire divisé sur les bords. Au centre du cadran est suspendue une tige mince d'ivoire à l'extrémité libre de laquelle est attachée une balle de sureau A. La tige d'ivoire est mobile autour de son point de suspension et peut s'écarter du cylindre T en même temps que la balle A. Lorsqu'on pose cet appareil sur un corps électrisé, le fluide

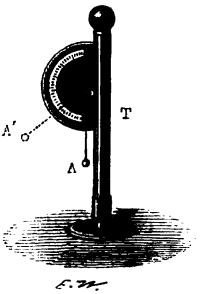


Fig. 25.

se répand sur le cylindre T, sur la tige d'ivoire et sur la balle de moelle de sureau. Toutes les pièces de l'instrument étant chargées de la même électricité se repoussent mutuellement, et la balle vient se fixer en A', à une distance angulaire d'autant plus grande que la charge du corps observé est elle-même plus forte.

Électroscope à feuilles d'or. — L'électroscope à feuilles d'or (Fig. 26) se compose d'une cloche de verre C portée sur une plaque métallique, ou sur un plateau de bois bien sec qui intercepte toute communication entre sa cavité et l'air extérieur. A travers la tubulure de la

Fig. 26.

cloche passe une tige métallique terminée, à sa partie supérieure, par une sphère B. Cette tige est munie, à sa partie inférieure, d'une pince B' dans laquelle sont engagées deux feuilles d'or *a* et *b*.

Quand l'électroscope est à l'état neutre, les deux lames d'or *a* et *b* tombent verticalement appliquées l'une contre l'autre. Si, alors, on approche un corps électrisé de la sphère B, le fluide neutre de la tige métallique est décomposé par induction ; le fluide de nom contraire à celui qui existe sur le corps est attiré en B, tandis que le fluide de même nom est refoulé sur les lames d'or qui divergent immédiatement. Quand on éloigne le corps électrisé, l'action inductrice cesse, les deux électricités

se combinent, recomposent le fluide neutre, et la divergence des feuilles d'or disparaît.

Pendant que le corps électrisé est en présence de la sphère B, si l'on touche rapidement la tige de l'électroscope avec le doigt, le fluide repoussé s'écoule dans le sol, l'autre reste accumulé en B. Lorsque ensuite on éloigne le corps électrisé, le fluide accumulé en B se répand sur la tige et sur les feuilles d'or qu'il fait diverger. L'électroscope reste ainsi chargé, *par influence*, d'électricité de nom contraire à celle du corps inducteur employé dans cette opération.

L'électroscope, étant chargé d'une *électricité connue*, peut servir à déterminer la nature du fluide accumulé sur un corps quelconque qu'on approche de la sphère B.

1° Si le corps est chargé de la même électricité que l'électroscope, tout le fluide libre de l'appareil est refoulé sur les feuilles d'or, et leur divergence augmente.

2° Si le corps est chargé de fluide de nom contraire à celui de l'électroscope, l'électricité de l'appareil est attirée vers la sphère B. Quand on rapproche avec précaution le corps électrisé, on observe les phénomènes suivants : D'abord la divergence diminue de plus en plus et finit par *disparaître complétement ;* puis la divergence des feuilles d'or recommence et augmente graduellement à mesure que le corps électrisé se déplace vers la sphère B. Ce dernier résultat provient de ce que, à une certaine distance, l'électricité du corps exerce une action assez puissante pour retenir toute l'électricité libre sur la sphère B et décomposer, par influence, le fluide neutre de la tige. A partir de ce moment, tout le fluide de nom

contraire à celui du corps inducteur est accumulé en B; la divergence des feuilles d'or est due à la charge d'électricité du même nom que celle du corps inducteur qui s'accumule sur leurs surfaces à la suite de la décomposition du fluide neutre de la tige.

3° Si le corps est lui-même à l'état neutre au moment où on le présente à la sphère B, l'écartement des feuilles d'or diminue comme dans le cas précédent; mais la divergence ne devient jamais *nulle*, et surtout, après s'être affaiblie, elle n'est pas augmentée par un nouveau degré de rapprochement du corps. La diminution de la divergence, dans ce cas, est due à ce que, en présence de l'électricité libre de l'électroscope, la face du corps la plus rapprochée de la sphère B se charge, par influence, de fluide de nom contraire.

Les feuilles d'or peuvent être remplacées par des brins de *paille* mobiles autour de leurs extrémités supérieures, ou par deux petites *balles* de moelle de sureau suspendues à des fils de lin; l'instrument prend alors le nom d'électroscope à *pailles* ou à *balles de sureau*.

Pour rendre l'électroscope à feuilles d'or plus sensible, on fixe sur le fond métallique deux colonnettes *c*, *d* métalliques aussi et terminées par de petites sphères (Fig. 27). Quand les feuilles d'or sont chargées d'électricité, elles accumulent, par influence, le fluide de nom contraire sur les petites sphères; ces sphères alors attirent les feuilles qui se repoussent elles-mêmes, et la divergence augmente.

Bien que, dans tous ces appareils, le degré d'écartement des corps légers augmente avec l'intensité de la

charge électrique, cependant ces deux éléments sont loin d'être proportionnels, et les électroscopes ne peuvent pas servir à mesurer les intensités des charges communiquées

Fig. 27.

à l'appareil. La balance de Coulomb, au contraire, est un véritable *électromètre ;* nous avons déjà vu que ses indications fournissent la mesure exacte de l'épaisseur de la couche électrique, ou de la *tension* en un point quelconque de la surface d'un conducteur électrisé.

Nous avons vu que l'électricité se porte à la surface des conducteurs et l'envahit tout entière, d'autre part nous savons que la *tension* d'un point quelconque est proportionnelle à l'*épaisseur* de la couche électrique qui la recouvre. Il résulte de ces notions que, pour une quantité d'électricité donnée, la tension et l'étendue de la surface d'un conducteur isolé éprouvent des variations simultanées et de sens inverse. L'électroscope fournit un moyen très simple de vérifier l'exactitude de cette déduction.

Sur la face supérieure d'un plateau métallique P (Fig. 28) fixé à la tige d'un électroscope à feuilles d'or, plaçons une chaîne métallique repliée sur elle-même et tenue par un manche isolant M, et communiquons au système une charge électrique ; les feuilles d'or se repoussent, mais leur divergence varie avec la position de la chaîne métallique. Lorsque cette chaîne est repliée sur le plateau, la surface extérieure des conducteurs a son *minimum* d'étendue, les feuilles d'or restent fixées dans leur position *a*, *b*, l'écartement est à son *maximum*. Si nous soulevons la chaîne, à mesure que la surface extérieure du système augmente, la tension s'affaiblit sur les feuilles d'or et leur divergence diminue; quand

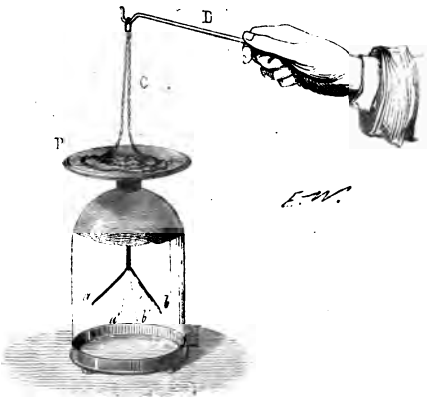


Fig. 28.

la chaîne est déroulée tout entière sans cesser de toucher le plateau P, la surface extérieure des conducteurs a son *maximum* d'étendue, et les feuilles d'or tombent à

leur *minimum* d'écartement, en a', b'. Il suffit de laisser retomber la chaîne sur le plateau pour que la tension augmente sur tous les points du système, et pour que les feuilles d'or reprennent leur position primitive d'écartement a, b.

ARTICLE III.

APPAREILS EMPLOYÉS POUR PRODUIRE L'ÉLECTRICITÉ.

Les appareils propres à fournir de l'électricité libre développée par le frottement sont : les *machines électriques* ordinaires dans lesquelles le corps frotté est un plateau ou un cylindre de verre, *l'électrophore* qui, à lui seul, vaut une machine électrique dans beaucoup de circonstances, et la *machine hydro-électrique*.

§ Ier. — Machines électriques.

Les machines électriques dans lesquelles le verre joue le rôle de corps frotté, quoique très nombreuses, ne diffèrent que par la forme et les dispositions des pièces qui les composent. Les unes ne peuvent fournir qu'un seul fluide à l'état de liberté, les autres permettent de recueillir à la fois les deux fluides.

Machine à un seul fluide. — La machine électrique ordinaire (Fig. 29), contient deux parties bien distinctes; celle où l'électricité est développée par le frottement, et celle où le fluide libre est recueilli et conservé.

1° *Appareil producteur.* — L'appareil producteur se compose d'un plateau circulaire de verre mobile sur son

centre, et de deux paires de coussins C, C' fixés à deux montants de bois verticaux ; la communication des coussins

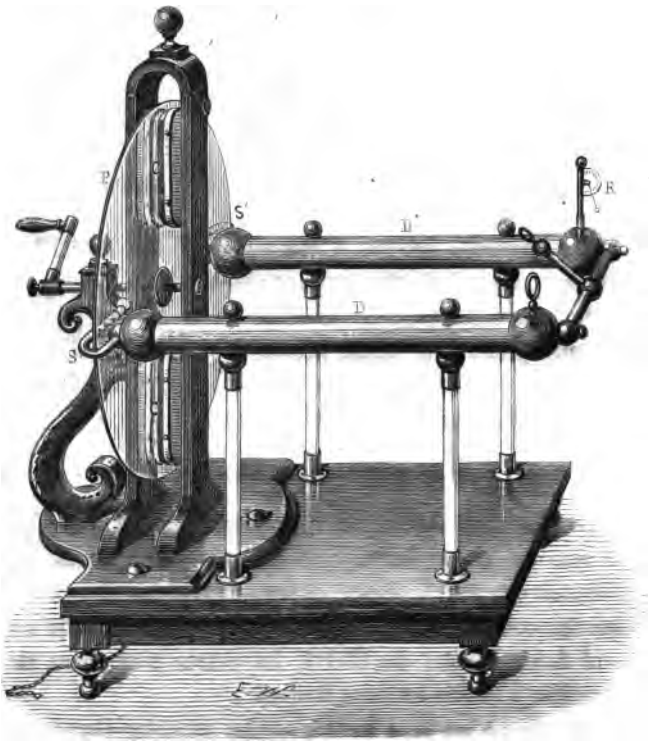


Fig. 29.

avec le sol est assurée par une série de conducteurs métalliques. Ces coussins sont ordinairement rembourrés de crin, et leur face frottante est un morceau de cuir enduit *d'or*

mussif (deuto-sulfure d'étain), ou de divers amalgames, parmi lesquels l'*amalgame de zinc* jouit d'une efficacité remarquable et doit être préféré à tous les autres. Lorsque le plateau est mis en rotation, son fluide neutre est décomposé par le frottement des deux paires de coussins, l'électricité positive reste accumulée sur le plateau, et la négative se porte sur les coussins, d'où elle s'écoule dans le sol.

2° *Appareil collecteur*. — L'appareil collecteur se compose de deux cylindres métalliques D, D′ dont les axes sont parallèles l'un à l'autre et perpendiculaires au plan du plateau de verre. Ces conducteurs, portés sur des pieds isolants de verre enduits d'une couche de vernis à la gomme laque, communiquent par une traverse métallique; leurs extrémités les plus éloignées du plateau sont terminées par des surfaces sphériques; leurs extrémités opposées portent des mâchoires métalliques S, S′ entre les branches desquelles s'engagent les bords du plateau. Ces mâchoires sont, d'ailleurs, garnies de pointes métalliques tournées vers le plateau de verre, perpendiculaires à son plan et assez écartées pour lui permettre de tourner sans les toucher.

Le plateau de verre, chargé d'électricité positive par le frottement des coussins, agit par influence sur les conducteurs D, D′. Le fluide neutre des cylindres est décomposé, l'électricité négative est attirée vers les pointes, et la positive est repoussée aux extrémités terminées par des surfaces sphériques. L'électricité négative s'écoule par les pointes des mâchoires S, S′ sous forme de petites aigrettes lumineuses, et vient se combiner avec l'élec-

tricité positive du plateau. Mais, comme la rotation continue, l'électricité positive, neutralisée à la surface du plateau à la hauteur des mâchoires S, S′, est sans cesse reproduite par le frottement des coussins; la décomposition du fluide neutre des cylindres et l'écoulement de l'électricité négative par les pointes persistent aussi, et la charge d'électricité positive augmente de plus en plus à la surface des conducteurs.

Pour s'opposer à la perte d'électricité que le contact de l'air ferait éprouver au plateau, on a soin de placer sur son trajet deux secteurs de taffetas qui l'enveloppent et le protégent contre l'action de l'atmosphère. Ces écrans isolants doivent occuper toute l'étendue des deux quarts de cercle qui, dans le sens du mouvement du plateau, séparent les coussins frotteurs C, C′ des mâchoires S, S′ des conducteurs D, D′. Sur un des conducteurs, on place un électroscope à cadran R qui permet de suivre les variations d'intensité de la charge électrique de la machine.

Machine à deux fluides. — La machine de Nairne (Fig. 30) se compose d'un grand cylindre de verre mobile sur son axe, et placé entre deux cylindres métalliques D, D′ portés eux-mêmes sur des pieds isolants. Le conducteur D′ est muni d'un coussin frotteur C de même longueur que le cylindre de verre; le conducteur D est garni de pointes métalliques dirigées vers le cylindre de verre et perpendiculaires à sa surface. Lorsque le cylindre de verre est en mouvement, son fluide neutre est décomposé par le frottement; l'électricité négative passe sur le coussin et s'accumule sur le conducteur isolé D′. Le verre électrisé positivement agit par influence sur le fluide neutre du

conducteur D, attire l'électricité négative vers les pointes et repousse la positive à la face opposée. Le fluide négatif s'écoule par les pointes et se combine avec le fluide po-

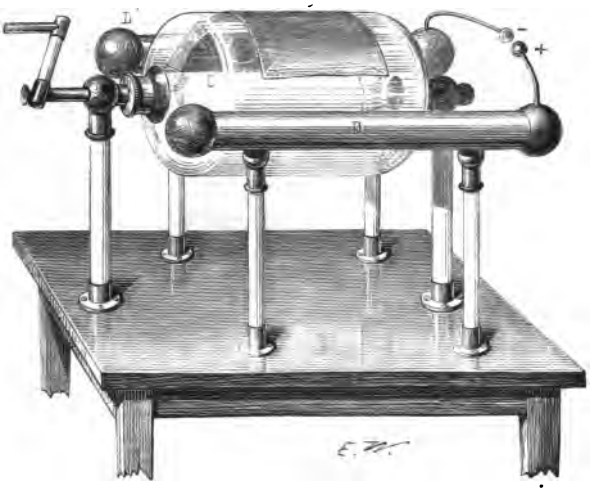


Fig. 30.

sitif du cylindre de verre, tandis que le conducteur D reste chargé d'électricité positive. Pour empêcher la déperdition d'électricité, on a soin de protéger le cylindre de verre contre le contact de l'air au moyen d'une pièce de taffetas fixée au bord supérieur du coussin frotteur.

Pendant que le cylindre de verre est en mouvement, on peut faire communiquer avec le sol l'un des deux conducteurs D, D' et laisser l'autre isolé. Dans ce cas l'une des deux électricités s'écoule dans le réservoir commun, et le conducteur isolé se charge seul de fluide libre.

On peut ainsi, à volonté, ne conserver sur la machine que l'une des deux électricités développées par le frottement. Quand un des conducteurs communique avec le sol, la tension de la charge libre peut atteindre un degré plus élevé que quand les deux sont maintenus isolés.

Expériences diverses. — Au conducteur de la machine on suspend (Fig. 31), à l'aide d'un crochet métallique, une verge métallique horizontale. Aux extrémités de cette

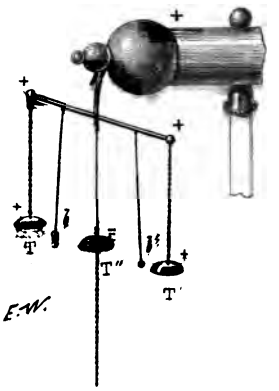


Fig. 31.

verge sont suspendus, par des chaînes métalliques, deux timbres T, T'; le timbre T'', placé entre les deux précédents, est au contraire suspendu à un fil isolant de soie, et communique avec le sol au moyen d'une chaîne métallique. Entre le timbre du milieu T'' et les deux timbres extrêmes T, T', sont suspendues, à l'aide d'un fil de soie isolant, deux petites boules métalliques *b*, *b'*. Au moment où le conducteur de la machine est électrisé, son fluide

positif passe sur la verge horizontale, et de là, à travers les chaînes métalliques qui les supportent, sur les timbres extrêmes T, T'. Le timbre intermédiaire T'', communiquant avec le sol, est soumis à l'influence des deux autres et chargé d'électricité négative. Les timbres T, T' électrisés attirent les boules métalliques *b* et *b'*; les boules arrivées au contact se chargent d'électricité positive, sont repoussées et viennent heurter le timbre du milieu T'' qui les ramène à l'état neutre, les charge d'électricité négative et les repousse à son tour. Tant que le conducteur de la machine est électrisé, les boules *b*, *b'* oscillent des timbres extrêmes au timbre du milieu et réciproquement; de ces chocs successifs, résulte une suite de sons qui ont fait donner à l'appareil le nom de *carillon électrique*.

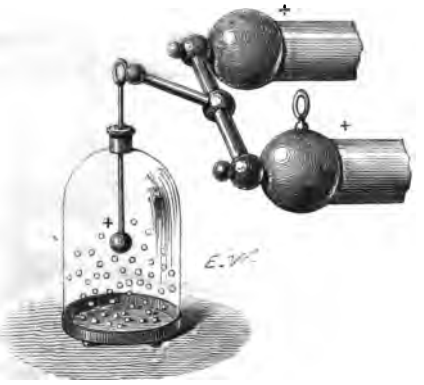


Fig. 32.

Sur un disque de métal en communication avec le sol on place de petites balles de moelle de sureau (Fig. 32); on recouvre le tout d'une cloche de verre munie d'une

tige métallique, terminée à l'extérieur par une anneau et à l'intérieur par une grosse sphère. Lorsque la tige est mise en communication avec le conducteur de la machine électrique, l'électricité positive se répand sur la sphère intérieure. Les petites balles de sureau, électrisées par influence, se chargent de fluide négatif, s'élancent vers la sphère qui les électrise positivement, sont repoussées vers le plateau métallique où elles retombent à l'état neutre. Électrisées de nouveau négativement par influence, ces balles s'élancent de nouveau vers la sphère, et continuent à exécuter ces mouvements alternatifs tant que la machine fournit du fluide à la sphère intérieure. Cette expérience sert de base à la théorie proposée par Volta pour expliquer la formation de la grêle dans les temps d'orage.

Lorsqu'on place un corps conducteur communiquant avec le sol en présence d'un des cylindres de la machine

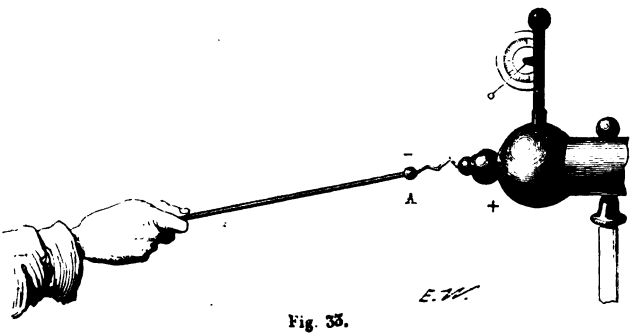


Fig. 33.

électrique, le fluide neutre du corps est décomposé par induction, l'électricité positive est repoussée dans le sol,

et la négative s'accumule sur l'extrémité la plus rapprochée de la machine. Il faut, dans cette expérience, distinguer deux cas.

Si le corps conducteur est terminé par une sphère A (Fig. 33), à mesure qu'on le rapproche de la machine, la charge d'électricité négative augmente; quand la distance est assez petite pour que la *tension électrique* puisse surmonter la résistance de l'air, le fluide positif de la machine et le négatif du corps influencé se combinent tout à coup, avec bruit et production d'une étincelle en *zigzag*. A la suite de cette opération, l'électroscope à cadran retombe instantanément à zéro, et la machine est déchargée.

Si le corps conducteur A est terminé par une pointe (Fig. 34), l'électricité négative, développée par induction,

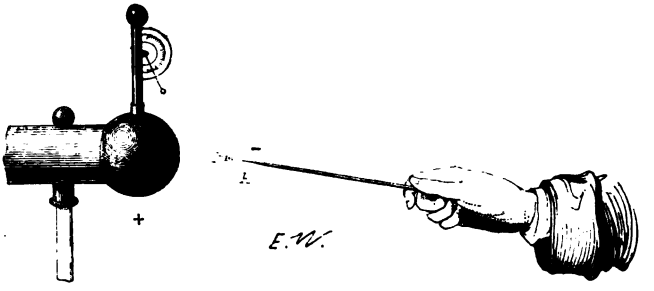


Fig. 34.

s'écoule par la pointe en faisant entendre un léger bruissement et neutralise le fluide positif de la machine. Dans l'obscurité, l'écoulement continuel de l'électricité négative est traduit par une lueur qui apparaît et se maintient à l'extrémité de la pointe tant que la machine fournit de

l'électricité positive. Quelle que soit, d'ailleurs, la vitesse de rotation imprimée au plateau de verre, lorsque le corps A est suffisamment rapproché du conducteur D, la quantité d'électricité négative fournie par la pointe est assez considérable pour maintenir l'électroscope à zéro, et neutraliser le fluide positif à mesure qu'il se développe sur la machine.

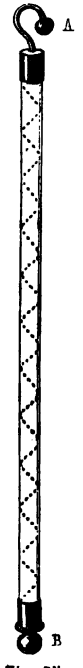


Fig. 35.

Sur un tube de verre muni à chaque extrémité d'une garniture métallique, on colle une série de losanges métalliques disposés en hélice et dont les pointes sont rapprochées à de très petites distances (Fig. 35). D'ailleurs, les losanges extrêmes de cette série sont directement en contact avec les garnitures métalliques.

Après avoir fait communiquer le tube avec le sol par son extrémité B, on approche la boule A du conducteur de la machine; une étincelle éclate entre cette boule et le conducteur, et le tube paraît illuminé dans toute sa longueur. Cet effet est dû à ce que, au moment de la décharge, une petite étincelle éclate entre les pointes en présence de ces losanges métalliques. Ce petit appareil prend le nom de *tube étincelant*.

§ II. — Électrophore.

L'électrophore se compose (Fig. 36) d'un gâteau circulaire de résine coulé dans un moule de métal ou de bois, et d'un plateau métallique à bords arrondis muni d'un

manche isolant. Pour avoir de l'électricité libre avec cet appareil, on frotte le gâteau avec une peau de chat, et l'on pose dessus le disque métallique. L'électricité négative de la résine agit par influence sur le plateau, attire le fluide positif sur sa face inférieure et repousse le négatif sur sa face supérieure. La quantité de fluide neutre décomposé sur le plateau métallique est considérable, parce que l'électricité de la résine agit à une très faible distance;

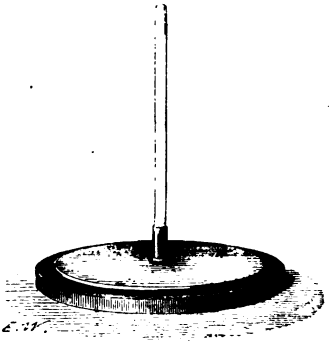


Fig. 36.

mais, comme le fluide positif du plateau se répartit sur une grande surface, il n'acquiert en aucun point assez de tension pour vaincre la résistance de la couche d'air très mince qui reste entre les deux corps. Si l'on touche le plateau avec le doigt, l'électricité négative de sa face supérieure s'écoule dans le sol. On peut alors l'enlever en le saisissant par son manche isolant; il est chargé d'une dose de fluide positif assez considérable pour fournir une forte étincelle. Cette opération peut être répétée plusieurs fois de suite, ou même à quelques jours de

distance, sans avoir besoin de frotter de nouveau le gâteau. La résine, en effet, est très isolante et attire très faiblement l'humidité de l'air ; pour cette double raison, elle ne perd que très lentement l'électricité dont elle est chargée. Quand on veut que le gâteau de résine conserve longtemps son fluide négatif, il est bon de s'opposer à la déperdition due au contact de l'air en laissant le plateau métallique déposé à sa surface.

Lampe électrique.— Cette propriété de l'électrophore a été mise à profit pour construire la *lampe électrique*

Fig. 37.

(Fig. 37). Dans une boîte de bois on place un gâteau de résine A sur lequel est fixé, au moyen d'une charnière,

un plateau métallique B; cet appareil forme un électrophore. Quand le gâteau de résine a été frotté avec une peau de chat, le plateau B, qui communique avec le sol au moyen d'une lame métallique fixée à la partie antérieure du gâteau de résine A, se charge d'électricité positive. A la partie supérieure de la boîte est fixé un flacon de verre, V, à dégagement d'hydrogène. Lorsqu'on ouvre le robinet du flacon V, l'hydrogène s'échappe en jet horizontal sous la pression du liquide contenu dans le vase V'. Le jet de gaz passe ainsi entre deux pointes métalliques. L'une de ces pointes *d* communique avec la garniture métallique de la tubulure du flacon V; l'autre pointe *c*, portée sur une tige isolante, communique avec un gros fil métallique vertical, isolé à sa partie inférieure au moyen du tube de verre *e*, et terminé, à l'intérieur de la boîte, par une boule métallique. Le robinet, en s'ouvrant, soulève le plateau B de l'électrophore au moyen d'un petit levier et du fil de soie *f*, et ce plateau, chargé d'électricité positive, vient s'appliquer contre la boule de l'extrémité inférieure du fil métallique vertical qui communique avec la pointe *c*. Ainsi, au moment où le gaz hydrogène, chassé du réservoir V, passe entre les deux pointes métalliques *c*, *d*, une étincelle électrique jaillit de la pointe *c* à la pointe *d*, et le gaz est enflammé. Le jet de flamme horizontal rencontre la mèche d'une bougie placée en face et l'allume. Comme, dans cet appareil, l'électrophore est renfermé dans une boîte où l'air est sec, le gâteau de résine peut conserver pendant plusieurs mois l'électricité qui lui a été communiquée par le frottement de la peau de chat.

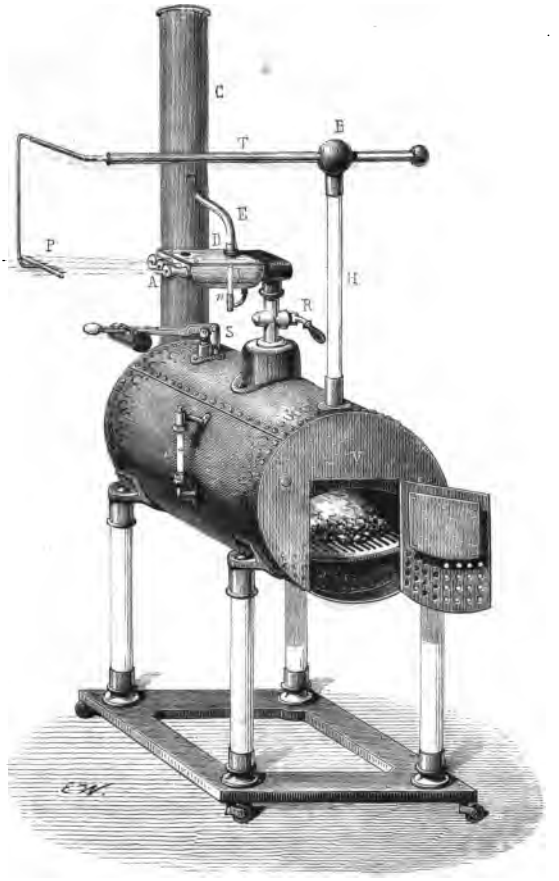


Fig. 38.

§ III. — Machine hydro-électrique.

Imaginée par M. Armstrong, la machine hydro-électrique (Fig. 38) se compose d'une chaudière à vapeur V portée sur quatre pieds de verre isolants, d'une boîte réfrigérante D, de trois becs d'échappement A à travers lesquels passe la vapeur d'eau, et d'un conducteur métallique T porté sur un pied isolant H.

Chaudière à vapeur. — Le foyer de la chaudière est intérieur, et le chauffage se fait avec du charbon de bois. *o* est un tube indicateur du niveau de l'eau; S est une soupape de sûreté qui permet de porter la tension de la vapeur à 8 ou 9 atmosphères. Quand le robinet R est ouvert, la vapeur s'engage dans trois tubes qui traversent la boîte réfrigérante D et s'échappe par les becs A.

Boîte réfrigérante. — La figure 39 représente un plan de cette boîte D dont on a enlevé le couvercle métallique. Elle est traversée par trois tubes métalliques qui communiquent, d'une part, avec le robinet R et, d'autre part, avec les becs d'échappement A. Chacun de ces tubes I est enveloppé d'une couche épaisse d'étoupe qui, par capillarité, reste constamment mouillée par l'eau froide versée dans le fond de la boîte. D'ailleurs, un tube recourbé *n* sert à constater qu'il y a toujours de l'eau dans la boîte. La vapeur, en traversant les tubes I, se refroidit et se condense en partie ; c'est donc réellement un jet de vapeur

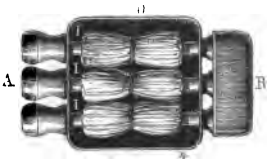


Fig. 39.

entraînant avec lui des *gouttelettes liquides* qui s'échappe à travers les becs A. Les vapeurs produites par l'eau qui imbibe l'étoupe de la boîte réfrigérante D s'échappent par le tube E et par la cheminée C de la chaudière.

Becs d'échappement. — Le bec d'échappement est la pièce la plus importante du système; la puissance de la machine dépend de son mode de construction et du choix des matériaux employés. La figure 40 en représente une coupe longitudinale. Chacun de ces becs se compose de trois pièces dont deux sont de cuivre et une de *bois de buis*. A, A est une pièce métallique percée, selon son axe de figure, d'un canal longitudinal, et munie d'une vis qui sert à fixer le bec à l'extrémité du tuyau par lequel s'écoule la vapeur. *b,b* est un cylindre creux de *bois de buis*, placé dans le canal de la pièce de cuivre A, A. *p,p* est une seconde pièce de cuivre qui se visse dans le canal de la pièce A,A, et sert à maintenir en place le cylindre de buis *b*, *b*. Cette pièce *p*, *p* porte, en outre, une plaque métallique *f* placée en face de l'ouverture intérieure du cylindre de buis. De cette manière, la vapeur, qui arrive par les tubes I de la boîte réfrigérante, se brise contre la plaque *f*, passe par la fente étroite qui sépare cette plaque du corps de la pièce *p*, *p*, et s'échappe à travers le cylindre creux de *buis b,b*. Le jet de vapeur suit ainsi le trajet sinueux indiqué par les flèches, et frotte contre la paroi intérieure du cylindre de buis.

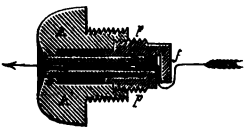


Fig. 40.

Conducteur. — Le conducteur (Fig. 38) est une tige

métallique horizontale T, qui passe à frottement dur dans une sphère de cuivre B portée elle-même sur une colonne isolante de verre H. Ce conducteur, dont un des bouts est terminé par une sphère, porte, à son autre extrémité recourbée un *peigne* métallique P dont les pointes sont complétement plongées dans le jet de vapeur.

Mode de production de l'électricité. — Lorsque la chaudière contient de l'*eau distillée*, pendant que le jet de vapeur, entraînant avec lui des *gouttelettes liquides*, traverse les becs d'échappement, le fluide neutre est décomposé par le frottement; les becs A et la chaudière V se chargent d'*électricité négative*, le jet de vapeur emporte avec lui l'*électricité positive* qu'il communique au peigne P et au conducteur T. M. Faraday (1) a étudié avec beaucoup de soin les circonstances au milieu desquelles se produit l'électricité dans la machine hydro-électrique. Les propositions suivantes contiennent les principaux résultats de ses recherches.

1° La production d'électricité n'est pas due au changement d'état du liquide contenu dans la chaudière.

2° Un courant de *vapeur sèche* ne produit aucun développement d'électricité. La production d'électricité est due au frottement que les *gouttelettes liquides*, entraînées par le jet de vapeur, exercent contre la paroi intérieure du cylindre de buis et contre tous les obstacles placés sur leur passage. De là, la nécessité de maintenir de l'eau froide dans la boîte réfrigérante D, afin de condenser une partie de la vapeur qui s'échappe par le robinet.

(1) *Archives de l'électricité*, 1843, t. III, p. 94 et 369.

3° Lorsqu'au lieu d'*eau distillée*, on met de l'*eau ordinaire* dans la chaudière, on n'obtient pas d'électricité. Il suffit de faire dissoudre dans l'eau distillée de très faibles proportions de matières salines, acides, alcalines, ou d'une substance quelconque capable de rendre l'eau *conductrice*, pour arrêter immédiatement le développement d'électricité.

4° L'augmentation de tension de la vapeur rend le frottement plus intense et favorise le développement d'électricité.

5° Lorsqu'on dispose l'expérience de manière que la vapeur d'eau entraîne avec elle de l'essence de térébenthine, de l'huile d'olives, de l'huile de laurier, de la graisse de porc, du spermaceti, de la cire d'abeilles, de la résine dissoute dans l'alcool, il y a encore production d'électricité; mais, dans tous ces cas, les tensions changent de signe, la chaudière devient *positive* et le jet devient *négatif*. M. Faraday pense que les gouttelettes d'eau sont alors enveloppées d'une pellicule mince de la substance étrangère entraînée, et que le frottement s'exerce entre cette pellicule et les parois des becs d'échappement. Cette circonstance expliquerait, d'après lui, le changement de signe des tensions que détermine la présence de ces divers corps dans le jet de vapeur.

6° La nature des matières choisies pour faire les becs d'échappement exerce de l'influence sur l'*intensité* des phénomènes produits. M. Faraday a successivement employé des métaux, des matières minérales très variées et des matières organiques; toujours le jet de vapeur d'eau s'échappait chargé d'*électricité positive*, mais l'intensité

de la tension obtenue variait avec la nature de la substance employée. Lorsque le frottement s'exerçait contre un tube d'ivoire ou un tuyau de plume, le jet de vapeur était *neutre* ou ne présentait que des traces à peine appréciables d'électricité positive. Le *bois de buis* paraît posséder un pouvoir excitateur supérieur à celui de tous les métaux et de toutes les autres substances minérales et organiques.

7° Enfin, M. Faraday a répété des expériences semblables en substituant, à la vapeur, de l'air comprimé dans un vase à parois résistantes. Avec de l'air *parfaitement sec* et dépouillé de toute *matière pulvérulente*, il n'a jamais obtenu aucune trace d'électricité libre. Avec de l'*air humide*, le bec d'échappement s'électrise *négativement;* ce résultat est dû au frottement des *gouttelettes d'eau* provenant de la vapeur condensée dans le jet de gaz. Avec un courant d'air entraînant des *poussières diverses*, il y a constamment production d'électricité, mais le signe de la tension électrique que prend le bec d'échappement dépend de la nature des poussières employées.

La machine hydro-électrique fournit de l'électricité à haute tension et en beaucoup plus grande quantité que les machines ordinaires à plateau de verre. Dans celle que construit M. Ruhmkorff, la chaudière a environ 80 centimètres de longueur sur 40 de diamètre, et la vapeur s'échappe par trois becs; elle est assez puissante pour donner un *jet continu* de grosses étincelles dont la longueur est d'environ 12 centimètres. Dans un temps donné, cet appareil fournit à peu près trois fois plus d'électricité qu'une bonne machine ordinaire ayant un plateau de verre de *un mètre* de diamètre. Ajoutons ce-

pendant que, sur le conducteur de la machine à plateau de verre, la tension est plus forte que sur celui de l'appareil hydro-électrique. En augmentant les dimensions de la chaudière et en multipliant le nombre des becs d'échappement, on peut rendre beaucoup plus considérables la *tension* et la *quantité* de l'électricité fournie par la machine hydro-électrique; avec ces puissants appareils, on obtient des *jets continus* d'étincelles très volumineuses et de plusieurs décimètres de longueur.

ARTICLE IV.

RÔLE JOUÉ PAR LE DIÉLECTRIQUE DANS L'INDUCTION.

L'induction à travers les diélectriques peut s'exercer en lignes courbes. — Mr. Faraday (1) a démontré la vérité de cette proposition par de très nombreuses expériences parmi lesquelles nous choisissons celles qui nous paraissent les plus probantes.

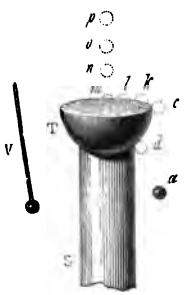


Fig 41.

Soit S (Fig. 41) un cylindre de gomme laque de 23 millimètres de diamètre sur 178 millimètres de longueur (2). Sur son extrémité supérieure excavée, on place une demi-sphère métallique T de 35 millimètres de diamètre. Soit, en outre, V la balle du chargeur d'une balance de torsion avec sa tige isolante. On frotte la moitié supérieure du cylindre avec un morceau de

(1) *Experimental Researches*, 2e édition, 1849, t. I, p. 381 et suiv.
(2) *Loc. cit.*, p. 383.

flanelle pour le charger d'électricité négative; puis on touche l'hémisphère T, pour faire écouler dans le sol l'électricité *négative* développée par induction à sa surface.

La balle V est alors successivement placée dans les diverses positions indiquées par les lettres *a*, *d*, *c*, *k*, *l*, *m*, *n*, *o*, *p*. Dans chacune de ces positions, la balle, tenue par son manche isolant, est d'abord mise en communication avec le sol, puis isolée et portée dans la balance de torsion pour mesurer la tension de la charge qu'elle a acquise; enfin, avant de procéder à une nouvelle observation, on a soin de décharger complétement la balle V. L'expérience prouve que, quelle que soit sa position, la balle V est toujours électrisée; d'ailleurs, comme on devait s'y attendre, puisque le cylindre inducteur S est *négatif*, toutes ces charges acquises par voie d'induction sont *positives*.

En *a*, en *d* et en *c*, l'induction a pu s'effectuer à travers l'air en *ligne droite*, ces trois résultats rentrent donc dans les faits connus; mais il n'en est pas de même des observations faites en *k*, *l*, *m*, *n*, *o*, *p*. Il est évident que l'induction, dans ces cas, ne pouvant pas s'exercer à travers l'hémisphère métallique T qui chaque fois est mis en communication avec le sol, n'a pu s'effectuer qu'à travers l'air ; mais alors l'action inductrice s'est nécessairement propagée *suivant des lignes courbes*. Il résulte des mesures données par M. Faraday que la tension de la charge d'induction acquise par la balle V dans ces diverses positions était :

En *c*, de	112°
En *k*, de	108°

En *l*, de	65°
En *m*, de	35°
En *n*, de	87°
En *o*, de	105°
En *p*, de	98°

Ainsi, l'induction en *ligne courbe*, qui commence à partir de la position *k*, est toujours plus faible que l'induction en *ligne droite* exercée en *c*. Nous voyons que, de la position *k* à la position *m*, l'intensité de l'induction va s'affaiblissant, pour augmenter ensuite de la position *m* à la position *o*. De *o* en *p*, l'action s'affaiblit de nouveau et continue à s'affaiblir à mesure que la balle V est placée dans des positions plus élevées au-dessus de l'hémisphère.

M. Faraday a répété ces expériences dans divers gaz, et les résultats ont toujours été les mêmes.

Électrisons d'abord par le frottement le cylindre de gomme laque S (Fig. 42), et mettons l'hémisphère métallique T en communication avec le sol. Puis, sur la partie supérieure de l'hémisphère métallique T (1), plaçons un vase mince de verre enduit d'une couche de vernis à la gomme laque, et versons au fond du vase de l'*huile de térébenthine* bien rectifiée.

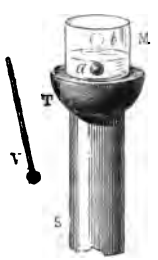


Fig. 42.

La balle V, placée alors successivement en *a* dans l'huile de térébenthine, et en *b* hors du liquide, se charge par induction d'électricité *positive*. Ici, évidemment, l'induction du cylindre S sur

(1) *Loc. cit.*, p. 381.

la balle V a dû se propager, en *ligne courbe*, à travers l'air, le verre et la térébenthine.

L'expérience étant disposée de la même manière (1), sur l'hémisphère métallique T mis préalablement en communication avec le sol et ensuite isolé, plaçons (Fig. 43) une plaque de soufre de 50 millimètres de largeur et de 15 millimètres d'épaisseur, à la partie supérieure de laquelle on a pratiqué une cavité. La balle V, placée successivement en *a*, en *b*, en *c* et en *d*, mise, chaque fois, en communication avec le sol et ensuite isolée, se charge, par induction, d'électricité *positive*. Les mêmes essais tentés avec divers corps solides isolants ont fourni les mêmes résultats.

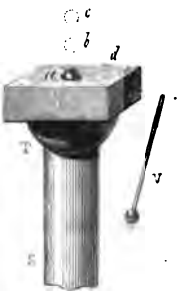


Fig. 43.

Ces expériences démontrent que, quel que soit leur état physique, l'induction peut se propager, en *lignes courbes*, à travers tous les corps isolants ou *diélectriques*.

Parmi les expériences de M. Faraday sur ce sujet important, nous en trouvons une fort simple (2) sur laquelle nous devons fixer notre attention. Si, dans les expériences précédentes, on place, autour et près du cylindre de gomme laque, un cylindre métallique creux, communiquant avec le sol, la balle V ne traduit aucune *action inductrice*, quelque position qu'on lui donne. Mais, du moment que le cylindre métallique est retiré, la balle V s'électrise par *induction*, comme nous l'avons dit plus

(1) *Loc. cit.*, p. 384.
(2) *Loc. cit.*, p. 383.

haut. Dans le cas où la balle V est placée au-dessus de l'hémisphère métallique T, le cylindre métallique en communication avec le sol, placé autour de la gomme laque, ne peut empêcher son électrisation qu'en arrêtant les *lignes courbes d'induction* qui, à travers l'air et les autres diélectriques, s'étendent de la gomme laque à cette balle. Cette observation nous paraît de nature à lever tous les doutes que l'on pourrait concevoir sur la réalité de la *propagation de l'induction en lignes courbes* à travers les diélectriques.

Pouvoir inducteur spécifique des diélectriques. — Soit (1) C un plateau métallique isolé et fixe (Fig. 44). A droite et à gauche on dispose deux plateaux métalliques

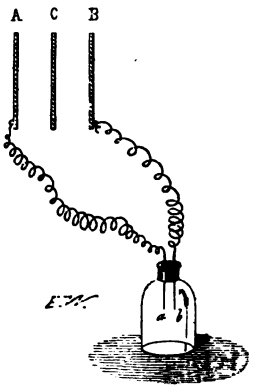


Fig. 44.

A et B portés sur des pieds isolants qui permettent de les rapprocher et de les éloigner du plateau C. Le plateau A

(1) *Loc. cit.*, p. 413.

communique, par un fil métallique, avec une feuille d'or *a*, et le plateau B est, de la même manière, mis en rapport avec une feuille d'or *b*. Ces deux feuilles d'or, *isolées* l'une de l'autre à leur point de suspension, sont placées dans une cloche de verre et séparées par un intervalle de quelques centimètres.

Les plateaux A et B étant placés à *égale distance* du plateau C, on charge ce dernier d'électricité positive. Au même moment, on met les plateaux A et B *en communication avec le sol*, puis on les *isole*. Les plateaux A et B sont ainsi, par voie d'induction, chargés d'électricité négative sur leurs faces antérieures ou tournées vers le plateau C; et les feuilles d'or *a* et *b* restent dans une position verticale, ne donnant aucune trace d'électricité libre. Il est évident, d'ailleurs, que le milieu diélectrique, l'*air*, étant le même et tout étant symétriquement disposé, l'action inductrice de C doit s'exercer avec la *même intensité* vers A et vers B, et que ces deux derniers plateaux doivent avoir des charges *égales* d'électricité négative. Les choses étant dans cet état, approchons le plateau A du plateau C; immédiatement les feuilles d'or s'attirent. Il est facile de s'assurer, dans ce cas, que la face postérieure du plateau A, le fil métallique correspondant et la feuille d'or *a* sont chargés d'électricité *positive*, tandis que la face postérieure du plateau B, le fil correspondant et la feuille d'or *b* sont chargés d'électricité *négative*. Le fluide positif trouvé sur la feuille *a* ne peut provenir que de la décomposition d'une nouvelle portion du fluide neutre de A au moment où le plateau a été rapproché de C; quant au fluide négatif trouvé sur la feuille *b*, son apparition in-

dique qu'une partie de l'électricité négative, primitivement développée et retenue par induction sur la face antérieure du plateau B, est devenue libre et s'est répandue sur sa face postérieure, sur son fil métallique et sur la feuille d'or *b*. Par conséquent, l'action inductrice du plateau C s'exerce avec *plus d'intensité* vers le plateau le plus rapproché A que vers le plateau le plus éloigné B. Il résulte de cette observation que : le diélectrique interposé restant le même, l'induction d'un corps électrisé sur un conducteur de *surface déterminée* augmente à mesure que la distance qui sépare les deux corps diminue.

Les plateaux A et B étant placés à la même distance du plateau C chargé d'électricité positive, et les feuilles d'or étant à l'état neutre et dans leur position verticale, plaçons un disque de gomme laque entre le plateau A et le plateau C. Immédiatement les feuilles d'or s'attirent, la feuille *a* est chargée d'électricité positive et la feuille *b* d'électricité négative. Retirons le disque de gomme laque, les feuilles d'or retombent à l'état neutre et reprennent leur position verticale. Plaçons alors le disque de gomme laque entre le plateau B et le plateau C ; les feuilles d'or s'attirent comme dans le cas précédent, mais *b* est chargé d'électricité positive et *a* d'électricité négative. D'ailleurs, il suffit d'enlever de nouveau le disque de gomme laque pour que les feuilles d'or reprennent leur état neutre et leur position verticale. L'interposition du disque de gomme laque produit donc le même effet que le *rapprochement* du plateau mobile correspondant. Mais, dans ce cas, les plateaux A et B sont à la même distance de C, et la seule différence consiste en ce que, d'un côté l'induc-

tion s'exerce à travers l'air, et de l'autre côté à travers un milieu diélectrique composé d'air et de gomme laque; il est donc évident que l'induction se transmet avec plus d'intensité à travers la gomme laque qu'à travers une couche d'air de même épaisseur.

Ce fait important peut être démontré d'une autre manière. Tout étant à l'état neutre et les plateaux A et B à la même distance du plateau C, plaçons le disque de gomme laque entre A et C; chargeons C d'électricité positive, mettons A et B en communication avec le sol, puis isolons ces deux plateaux. Chacun des plateaux A et B retient ainsi une charge d'électricité négative proportionnelle à l'intensité de l'action inductrice qu'il éprouve, et les feuilles d'or restent à l'état neutre dans leur position verticale. Cela fait, enlevons le disque de gomme laque, immédiatement les feuilles s'attirent, *a* est chargé d'électricité négative et *b* d'électricité positive. L'interprétation de ces résultats est facile; tant que le disque de gomme laque reste interposé, l'induction de C est plus forte vers A que vers B, et, par suite, la charge négative développée sur A est plus considérable que celle de B. Lorsque, au contraire, le disque de gomme laque est enlevé, l'induction de C s'exerce avec la même intensité sur les deux plateaux, une partie du fluide négatif primitivement retenu sur A devient libre et se répand sur *a*, tandis que l'électricité positive provenant d'une nouvelle quantité de fluide neutre décomposé sur B se montre à la surface de la feuille d'or *b*.

On obtient des résultats de même genre en substituant des disques de soufre, de verre, de spermaceti, au disque

de gomme laque. Ces observations démontrent que, sous une même épaisseur, les corps isolants ou *diélectriques* n'ont pas tous la même *capacité inductrice* ou le même *pouvoir inducteur*. M. Faraday (1) a publié un grand travail sur la détermination du *pouvoir inducteur spécifique* des divers diélectriques. Ne pouvant entrer ici dans les détails de ces importantes recherches, nous nous contenterons d'en citer les résultats généraux.

1° Tous les gaz simples ou composés ont le même pouvoir inducteur spécifique. La capacité inductrice d'un gaz est indépendante de sa température et de la pression qu'il supporte.

2° M. Faraday a déterminé le pouvoir inducteur spécifique de quatre diélectriques solides. Prenant, pour *unité*, la *capacité* de l'air atmosphérique, il a trouvé que les *pouvoirs inducteurs* de ces corps sont dans les rapports suivants :

Air atmosphérique	1,00
Spermaceti	1,45
Verre	1,76
Gomme laque	2,00
Soufre	2,24

Dans un travail postérieur, M. Harris (2) a donné les valeurs suivantes pour le pouvoir inducteur spécifique des diélectriques solides.

Air	1,00	Cire d'abeilles	1,86
Résine	1,77	Verre	1,90
Poix	1,80	Gomme laque	1,95

(1) *Loc. cit.*, p. 393.
(2) De la Rive, *Traité d'électricité*, t. I, p. 134.

3° M. Faraday a trouvé que les diélectriques liquides, tels que l'*huile de térébenthine* et le *naphte rectifié*, ont un pouvoir inducteur spécifique plus considérable que celui de l'air.

4° M. Faraday (1) a cherché si le pouvoir inducteur spécifique des *diélectriques cristallisés* reste le même dans toutes les directions. Il a successivement étudié les cristaux suivant des lignes parallèles et perpendiculaires à l'axe optique, sans rencontrer de différence constante dans les résultats.

Cette différence de capacité inductrice des divers diélectriques dépend, probablement, de la plus ou moins grande facilité avec laquelle leurs molécules prennent l'*état polaire* sans lequel il n'y a pas d'induction.

État moléculaire des diélectriques pendant l'induction. — Les recherches de M. Faraday prouvent que le diélectrique, placé entre le corps électrisé et le conducteur induit, n'agit pas seulement en opposant une résistance à la combinaison des deux électricités en présence ; pendant l'induction, le rôle du diélectrique est évidemment *actif*. Pour expliquer le mode de propagation de l'action inductrice à travers les corps isolants, l'éminent physicien anglais a émis (2), sur l'état moléculaire des diélectriques pendant l'induction, des idées générales que nous devons exposer sommairement, en ayant soin de rappeler les observations qui justifient l'exactitude de ses vues.

D'après M. Faraday, toute molécule pondérable, quelle

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 539.
(2) *Loc. cit.*, passim.

que soit sa nature, placée en présence d'un corps électrisé, se *polarise;* ses deux moitiés se constituent en tensions opposées. L'électricité de nature contraire à celle du corps *inducteur* existe sur la moitié de la molécule qui regarde ce corps; l'autre fluide se trouve sur la moitié opposée. Lorsque deux corps, l'un électrisé, l'autre à l'état neutre, sont en présence, chacune des molécules de la première tranche du corps à l'état neutre tournée vers le corps électrisé se polarise comme si elle était seule; cette première tranche de molécules agit, par induction, sur la seconde tranche dont chaque molécule se polarise à son tour, l'action se propage de tranche en tranche, et, dans l'intérieur du corps primitivement à l'état neutre, toutes les molécules sont polarisées de telle manière que deux particules successives se regardent par leurs pôles de noms contraires.

Dans les corps métalliques, deux tranches contiguës de molécules polarisées ne peuvent pas rester en présence sans échanger immédiatement leurs électricités de noms contraires. De cette facilité qu'ont les particules métalliques contiguës à se décharger les unes sur les autres, il résulte que l'état de polarisation des tranches intermédiaires d'un conducteur soumis à l'induction disparaît à mesure qu'il est produit; mais les molécules des tranches extrêmes conservent *un* de leurs pôles, et les électricités contraires se manifestent seulement à la surface extérieure du corps. Ainsi s'établit l'état définitif d'un corps métallique isolé soumis à l'induction, état que nous avons déjà décrit (page 51) et dans lequel il se partage en deux portions *polaires* dont les *tensions* sont de signes contraires.

Lorsqu'un corps isolant, quel que soit d'ailleurs son état physique, est en présence d'un corps électrisé, ses molécules se polarisent comme celles d'un métal, mais le passage de l'électricité d'une molécule quelconque à une molécule voisine s'opère avec beaucoup de difficulté; tant que la tension ne dépasse pas certaines limites, variables avec la propriété plus ou moins isolante de la substance, ces molécules polarisées ne se déchargent pas l'une sur l'autre. Il en résulte nécessairement que, tant que dure l'influence du corps électrisé, l'état polaire des molécules persiste lui-même dans toute l'étendue du diélectrique.

Le degré de tension polaire que peuvent acquérir et conserver les molécules d'un corps quelconque soumis à l'induction dépend donc de la résistance que l'électricité éprouve à passer d'une molécule à l'autre, ou de son *pouvoir isolant*. Extrêmement faible dans les métaux qui sont de *bons conducteurs*, livrent un passage facile à l'électricité et se mettent immédiatement en équilibre de tension dès qu'ils sont en contact apparent, cette résistance est déjà très sensible dans les oxydes métalliques, la glace, les matières organiques desséchées, etc., qui ne sont que de *médiocres conducteurs;* enfin, elle atteint son *maximum* dans les corps qui, comme la gomme laque, le verre très sec, le soufre, etc., se prêtent peu aux échanges d'électricité, ne permettent que très difficilement aux fluides électriques de les traverser ou de se déplacer à leur surface, et sont, par cela même, connus sous la dénomination de *corps isolants*.

Quelque probable qu'il paraisse, cet état de polarisation

des molécules des diélectriques soumis à l'influence d'un corps électrisé ne peut être admis qu'à la condition d'être démontré par des expériences directes. M. Faraday (1) a publié sur ce sujet une observation très importante. Dans un vase de verre M (Fig. 45) on verse de l'huile

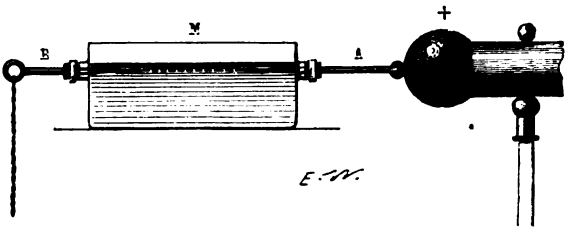


Fig. 45.

de térébenthine rectifiée ; à travers les parois du vase on fait passer deux tiges métalliques A et B terminées par des pointes, et l'on jette sur le liquide de petits fragments de fils de soie blanche. La tige A est mise en communication avec le conducteur d'une machine électrique, et la tige B est en communication avec le sol. Au moment où la décharge de la machine s'effectue de A en B à travers l'huile de térébenthine, les fragments de soie accourent de toutes les parties du liquide, s'agitent entre les pointes métalliques, se réunissent bout à bout et forment une véritable chaîne entre la pointe de A et la pointe de B. Tant que continue le passage de l'électricité, cet arrangement persiste, et les fragments opposent une résistance considérable quand on essaie de les séparer avec une tige

(1) *Loc. cit.*, p. 429.

de verre ; mais du moment que le flux électrique cesse, la chaîne se rompt d'elle-même et les fragments de fils de soie se dispersent. Cette adhérence des fils de soie paraît à M. Faraday une preuve de la polarisation de chaque fragment créée par le passage de l'électricité. Les fils de soie, dans cette circonstance, seraient dans la même condition que les particules de fer qui se disposent en série linéaire entre les pôles d'un aimant en fer à cheval, et leur polarité représenterait exactement l'état des molécules de l'huile de térébenthine elle-même pendant le passage du flux électrique. M. Matteucci a répété cette expérience (1) en remplaçant les fils de soie par des poudres diverses tenues en suspension dans l'huile de térébenthine; toujours il a vu les corpuscules se réunir en série linéaire entre les deux pointes métalliques, et conserver cette disposition tant que durait le flux d'électricité.

Enfin, M. Matteucci (2) a fait une expérience qui démontre, d'une manière incontestable, la polarisation des molécules d'un corps isolant placé en face d'un corps électrisé. Dans une cage de verre dont l'air est desséché avec de la chaux caustique, il suspend avec un fil de cocon une aiguille de soufre, de gomme laque ou d'acide stéarique, de 10 millimètres de longueur sur 2 millimètres de diamètre. Après s'être assuré que l'aiguille isolante est à l'état neutre, il introduit sous la cage un corps électrisé en face et à environ 8 à 10 centimètres de l'une des extrémités de l'aiguille. Immédiatement les extrémités de l'ai-

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1846, t. II, p. 373.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1849, t. XXVII, p. 134.

guille sont électrisées et leurs tensions sont de nature opposée. D'ailleurs, l'électricité de l'extrémité qui regarde le corps inducteur est de nom contraire à celle de ce corps. Cet état persiste tant que dure l'induction ; mais, du moment qu'on éloigne le corps inducteur, l'aiguille retombe instantanément à l'état neutre. La rapidité de l'apparition et de la disparition des tensions opposées aux extrémités de ces aiguilles, et la difficulté que l'électricité éprouve à se mouvoir sur la surface des corps isolants, ne peuvent laisser aucun doute sur la signification de ces faits. Évidemment, ici, sous l'influence d'un corps électrisé voisin, toutes les molécules de l'aiguille isolante ont été polarisées, et les tensions opposées des extrémités de l'aiguille sont l'effet de la persistance de cet état polaire des molécules tant que dure l'induction elle-même.

Il résulte de tous ces faits que, en présence d'un corps électrisé, les molécules d'une substance isolante ou diélectrique se placent dans une condition analogue à celle des molécules d'un barreau de fer doux soumis à l'influence du pôle d'un aimant. En cas pareil, dit M. Faraday(1), « les particules d'un diélectrique isolant peuvent être comparées à une série de petites aiguilles magnétiques, ou plus exactement à une série de petits conducteurs isolés. » Nous avons vu, en effet (page 51), que, quand un corps électrisé est placé en face d'une des extrémités d'une série de conducteurs isolés, chacun des conducteurs se partage en deux portions chargées d'électricités de noms contraires ; cet état polaire persiste tant que

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 535.

l'induction est maintenue, et cesse instantanément au moment où le corps inducteur est éloigné ou déchargé. L'état polaire des molécules du diélectrique est un *état forcé* qui disparaît par la combinaison des deux électricités développées et maintenues à la surface de chaque molécule, et par le retour de toutes les molécules à l'état neutre au moment même où l'induction cesse.

Ainsi donc, quand deux conducteurs isolés, l'un électrisé, l'autre à l'état neutre, sont en présence, séparés par un diélectrique solide, liquide ou gazeux interposé, le premier effet produit est la polarisation des couches du diélectrique, et cet état polaire persiste parce que les molécules du diélectrique ne se déchargent pas l'une sur l'autre tant que leurs tensions ne dépassent pas certaines limites variables avec la nature de la substance employée. La couche polarisée du diélectrique en contact avec la surface du conducteur isolé à l'état neutre réagit, à son tour, sur les molécules du conducteur et les *polarise*. Mais les molécules contiguës du conducteur se déchargent immédiatement les unes sur les autres par les pôles de noms contraires, et les deux électricités libres apparaissent à sa surface qui se partage en deux portions *polaires* ayant des tensions de signes contraires. Ces deux électricités restent à la surface du conducteur isolé, parce que, là, elles se trouvent en contact avec de nouvelles couches diélectriques isolantes qui, sous leur influence, se polarisent sans leur livrer passage.

La quantité d'électricité développée par induction est toujours égale à celle qui existe à l'état libre sur le corps inducteur. — M. Faraday a démontré expéri-

mentalement l'exactitude de ce principe fondamental de la théorie de l'induction, dans une lettre adressée à M. Phillips (1). Cette démonstration est d'une importance si grande, que nous devons la reproduire ici dans ses principaux détails.

Soit A (Fig. 46) un vase d'étain cylindrique et isolé de 26,7 centimètres de hauteur sur 17,8 centimètres de dia-

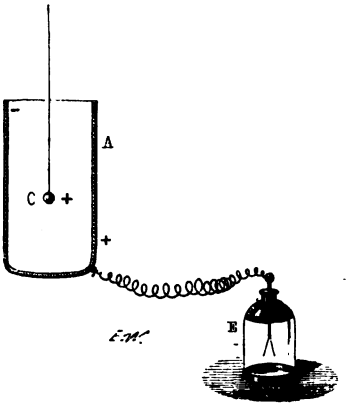


Fig. 46.

mètre. Soit C une sphère métallique de surface très petite par rapport à celle de A. Pour la mettre à l'abri de l'influence de la main qui la soutient, cette sphère C est suspendue à un fil de soie isolant de 12 décimètres de longueur. La face extérieure du vase A est en communication, par un fil métallique, avec un électroscope à feuilles d'or E. Le vase A et l'électroscope étant à l'état neutre,

(1) *Experimental Researches*, t. II, p. 279.

chargeons la sphère C d'électricité positive. Toutes les fois que la sphère C est introduite dans le vase, A s'électrise par induction, sa face intérieure est chargée d'électricité négative, l'électricité positive se répand sur sa face extérieure et sur l'électroscope, et les feuilles d'or divergent. Au moment où l'on enlève la sphère, le vase A et l'électroscope retombent à l'état neutre, les feuilles d'or reprennent leur position verticale.

Lorsque la sphère C chargée d'électricité positive est introduite dans le vase, la divergence des feuilles d'or augmente jusqu'à ce que C soit à 76 millimètres au-dessous des bords. A partir de cette position, la divergence reste la même, à quelque profondeur que la sphère soit descendue. Ce fait indique que, à 76 millimètres de profondeur, l'action inductrice de la sphère s'exerce *tout entière* sur la face intérieure du vase, ou que du moins l'induction exercée par cette sphère sur les corps environnants, à travers l'ouverture supérieure, est complétement négligeable. Pourvu que cette sphère soit maintenue à plus de 76 millimètres de profondeur, il est absolument indifférent qu'elle soit placée sur l'axe du vase A plus ou moins près de son fond, ou que, portée à droite ou à gauche de l'axe, elle soit rapprochée des parois latérales; dans tous ces cas, la divergence des feuilles d'or reste exactement *la même*, et, conséquemment, la quantité totale d'électricité positive développée par induction sur la surface extérieure de A reste *la même*.

Enfin supposons qu'on touche, avec la sphère C, un point de la surface intérieure du vase. Après ce contact, la sphère est complétement déchargée, il n'y a plus sur A

d'électricité développée par induction, mais *toute* l'électricité de C est passée sur A ; dans ce cas encore, la divergence des feuilles d'or de l'électroscope reste *la même*. L'électricité positive, accumulée par induction sur la face extérieure du vase A, est donc *égale en quantité* à celle qui existe à l'état libre sur la balle inductrice C.

Prenons maintenant quatre vases métalliques (Fig. 47), isolés les uns des autres latéralement par des couches,

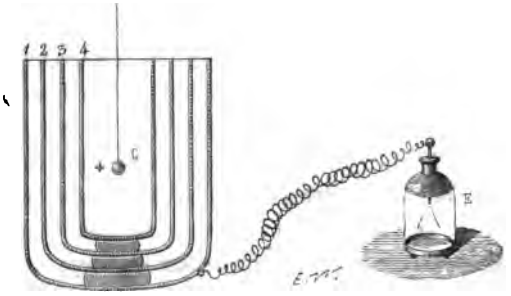


Fig. 47.

d'air, et à leur partie inférieure par des disques de gomme laque sur lesquels ils reposent. L'action inductrice de la sphère C polarisera le vase 4 ; celui-ci à son tour agira, par son électricité positive, sur le vase 3 ; le vase 3 agira de même sur le vase 2 ; le vase 2 polarisera le vase 1, et l'électricité positive de ce dernier, se répandant sur l'électroscope, fera diverger les feuilles d'or. Si la charge positive de la sphère C est *la même* que dans l'expérience précédente, la divergence des feuilles d'or de l'électroscope restera aussi exactement *la même ;* en d'autres termes, la quantité d'électricité positive déve-

loppée par induction, sur la face extérieure du vase 1, à travers les trois vases intérieurs et les couches d'air interposées, sera exactement égale à celle qui s'y serait accumulée si, les trois vases intérieurs ayant été supprimés, l'induction s'était exercée directement de C sur ce vase 1 à travers une masse d'air. Supposons maintenant que, à l'aide de tiges métalliques suspendus à des fils isolants de soie, on fasse communiquer 4 avec 3, puis 4 avec 3 et en même temps 3 avec 2, puis 4 avec 3, 3 avec 2 et en même temps 2 avec 1 ; dans chacun de ces trois cas, la divergence des feuilles d'or reste la *même*, et égale à ce qu'elle était quand les quatre vases étaient complétement isolés les uns des autres. Enfin, les quatre vases étant complétement isolés, ou réunis deux à deux par des tiges métalliques, ou même tous en communication, touchons le vase 4 avec C ; la sphère sera complétement déchargée, son électricité passera tout entière sur l'un des vases intérieurs ou même sur le vase extérieur, et cependant la divergence des feuilles d'or n'éprouvera aucune altération.

On peut encore remplacer les vases métalliques 2, 3, 4, par un cylindre épais de soufre, de gomme laque ou de toute autre substance isolante ou conductrice, et toujours la divergence des feuilles d'or restera *la même*. En d'autres termes, la quantité d'électricité positive développée par induction sur la face externe du vase 1 restera, dans tous les cas, exactement égale à celle qui existe sur la sphère inductrice C.

Au lieu d'une sphère unique, introduisons dans le vase 4 un nombre quelconque de petites sphères toutes

électrisées et occupant des positions différentes. Quelle que soit l'influence exercée par chacune de ces sphères sur ses voisines, la divergence des feuilles de l'électroscope sera *la même* que si toutes leurs charges partielles étaient réunies en une seule charge sur une seule sphère, et la quantité d'électricité positive accumulée sur la face externe du vase 1 sera toujours égale à la somme des charges des sphères intérieures. Si, dans ce cas, on touche le vase 4 avec une des sphères intérieures de manière à faire passer sur ses parois toute la charge de cette sphère, l'action des autres sphères ne sera pas troublée et la divergence des feuilles d'or n'éprouvera aucune perturbation. Il résulte de là qu'une charge quelconque, communiquée directement à l'un des quatre vases métalliques, n'empêche pas une sphère intérieure de développer, par induction, sur le vase le plus extérieur, une quantité d'électricité égale à celle qu'elle contient elle-même.

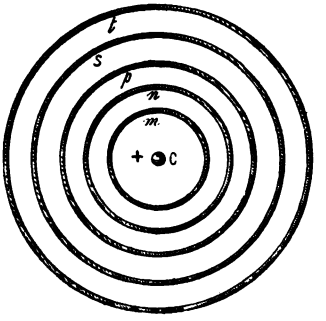


Fig. 48.

Imaginons (Fig. 48) une sphère C chargée d'électricité positive, isolée et abandonnée à elle-même dans l'atmos-

phère ; l'air joue, par rapport à cette sphère, le rôle de diélectrique, et ses molécules se polarisent dans toutes les directions, de manière à avoir toutes leur *pôle* négatif tourné vers le centre de la sphère C. Si nous prenons cette sphère comme centre d'une série d'enveloppes *conductrices* isolées *m*, *n*, *p*, *s*, *t*, toutes ces enveloppes seront soumises à l'*induction ;* chacune d'elles contiendra nécessairement, sur sa face interne, autant d'électricité négative, et, sur sa face externe, autant d'électricité positive que la sphère inductrice C contient elle-même d'électricité positive sur sa surface. C'est donc, en définitive, la même quantité d'électricité qui est uniformément répandue sur chacune de ces enveloppes. Si nous découpons maintenant, sur *m*, *n*, *p*, *s*, *t*, des segments de *même étendue*, les charges électriques ou les tensions de ces segments seront nécessairement en raison inverse des surfaces ou des carrés des rayons des enveloppes sphériques auxquelles ils appartiennent. Ainsi, une charge *invariable*, accumulée sur un *point matériel*, développe, par induction, sur une surface conductrice *d'étendue invariable* et perpendiculaire à la ligne menée de ce *point matériel* à son centre de figure, des quantités d'électricité qui sont en raison inverse des carrés des distances.

Tant que ces enveloppes concentriques et conductrices restent toutes isolées, chacune d'elles contient la même quantité d'électricité négative sur sa surface interne, et d'électricité positive sur sa surface externe. Supposons que l'une d'elles, l'enveloppe *p* par exemple, soit mise en communication avec le sol, immédiatement elle perdra toute son électricité positive, sa surface externe retombera à l'état

neutre, et sa surface interne conservera une charge négative égale en quantité à la charge positive de la sphère C. Les enveloppes *m* et *n*, placées entre la sphère C et l'enveloppe *p*, seront toujours soumises à l'induction et conserveront leur état polaire ; mais toute induction s'arrêtera à la surface de *p*, et les enveloppes plus éloignées *s*, *t*, retomberont instantanément à l'état neutre, par suite de la combinaison de leurs fluides positif et négatif.

Entre la sphère C, chargée d'électricité positive et isolée, et la sphère C′, isolée aussi, mais à l'état neutre, plaçons (Fig. 49) un disque métallique en communication avec

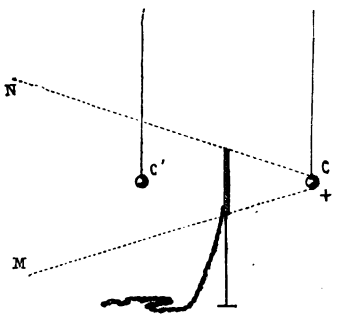


Fig. 49.

le sol. Par les bords du disque menons des tangentes à la surface de la sphère inductrice C. Puisque le disque est en communication avec le sol, l'action inductrice ne peut pas s'exercer à travers son épaisseur, et les molécules d'air placées derrière le disque, dans l'espace compris entre les tangentes M, N, ne peuvent pas être *directement* polarisées ; par conséquent, la sphère C′, qui

est comprise dans cet intervalle, doit échapper à toute action inductrice *directe*. Cependant les faits rapportés page 84 établissent que, si le disque n'est pas trop étendu en surface, l'action de la sphère C se fait sentir sur la sphère C′, et prouvent que l'induction peut se propager en *ligne courbe*. Nous pouvons maintenant nous rendre compte de l'existence de ces lignes courbes d'induction découvertes par M. Faraday. Imaginons, en effet, des séries paralleles et rectilignes de molécules diélectriques polarisées toutes de la même manière; chacune de ces molécules devient un véritable centre d'induction et agit, autour d'elle, dans toutes les directions possibles. Dans une masse diélectrique polarisée, l'action d'une molécule quelconque ne s'exerce donc pas suivant telle ou telle ligne déterminée, mais se fait sentir sur toutes les molécules environnantes, quelles que soient leurs positions. Dans l'exemple actuel, les molécules d'air placées derrière le disque, dans l'intervalle compris entre les tangentes M, N, échappent à toute induction *directe*, mais, influencées par les molécules polarisées situées en dehors des tangentes N, M, elles se polarisent *indirectement* et propagent, *en ligne courbe*, l'action inductrice de la sphère C jusqu'à la sphère C′.

De quelque manière que nous l'envisagions, une charge électrique déterminée nous apparaît comme une *force* susceptible d'agir à distance, par induction, à travers une succession de milieux isolants ou de conducteurs *isolés* séparés par des diélectriques. Mais quels que soient le nombre, la nature, l'état des intermédiaires employés, la *force* reste toujours *définie*, et *son action totale est in-*

variable. Il n'y a rien, dans tout cela, qui puisse se concilier avec l'idée d'une diminution ou d'une augmentation d'intensité.

De toutes ces considérations il nous paraît résulter que :

1° Les corps isolants ou diélectriques deviennent, par le fait de la polarisation de leurs molécules, de véritables *machines* capables de transmettre l'action d'une charge électrique donnée dans toutes les directions, sans affaiblissement ni exaltation.

2° L'induction n'est que la *transmission* de l'action de la charge électrique d'un conducteur isolé à un autre conducteur placé à distance, par l'intermédiaire des molécules polarisées d'un milieu ou d'une succession de milieux isolants ou diélectriques interposés.

Déductions générales. — Un corps quelconque chargé d'électricité positive ou négative réagit par induction, à travers l'air et les autres diélectriques interposés, sur les conducteurs environnants, et développe une charge égale d'électricité de nom contraire sur leurs surfaces correspondantes. Cette induction s'exerce par l'intermédiaire de l'air ou du diélectrique quelconque interposé dont les molécules polarisées la propagent dans toutes les directions, en ligne droite et en ligne courbe. On comprend ainsi comment, dans un corps conducteur, la charge électrique reste localisée sur la surface extérieure à laquelle elle a été communiquée ou sur laquelle elle a été développée. En effet, d'une part, elle y est maintenue par la tension polaire de signe contraire des molécules d'air ou de tout autre diélectrique contiguës à cette surface, et, d'autre part, elle y est retenue par la résistance que ces molécules

opposent à son passage. Cette manière de comprendre le rôle de l'air dans les phénomènes électriques est bien plus satisfaisante que l'hypothèse inadmissible d'une action mécanique de *pression* exercée par l'atmosphère sur les fluides électriques. A ce point de vue, l'état électrique positif ou négatif n'est pas un *état absolu* de la matière, mais un *état relatif* de corps en présence constitués dans des conditions de *tensions opposées*.

Toute charge s'accompagne nécessairement d'une action inductrice de la particule électrisée sur les particules environnantes. Dès lors, dans une sphère métallique pleine, une quantité quelconque d'électricité communiquée ne peut exister qu'à la surface. En effet, une molécule prise à l'intérieur de la sphère, étant entourée de molécules de même nature, c'est-à-dire incapables comme elle de conserver un état polaire, céderait instantanément aux molécules voisines une charge qui lui serait propre; cette charge, transmise de molécule à molécule, arriverait à la surface où elle serait maintenue et retenue par la réaction des molécules polarisées de l'air ambiant. Ainsi donc, pour ce qui concerne la localisation de l'électricité à la surface des conducteurs, la théorie de M. Faraday est parfaitement d'accord avec les indications des calculs de Poisson fondés sur l'hypothèse de l'existence de deux fluides électriques, et conduit aux mêmes conséquences que les résultats des expériences de Coulomb.

M. Faraday a cherché expérimentalement (1) ce que devient une charge communiquée à une enveloppe

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 365 et 366.

conductrice, isolée, pleine d'air ou de toute autre substance diélectrique. Il remplit une sphère métalliquecreuse d'huile de térébenthine rectifiée, puis il isola le système et mit la sphère en contact avec le conducteur d'une machine électrique; il lui fut impossible de constater la présence de l'électricité ailleurs que sur la surface extérieure de la sphère métallique. Il fit ensuite construire un très grand cube creux, plein d'air, dont les parois étaient conductrices. Ce cube fut isolé avec soin, et il plaça, dans son intérieur, des électroscopes à feuilles d'or très sensibles. L'extérieur du cube fut mis en communication avec une puissante machine électrique; la charge communiquée était assez considérable pour que l'extérieur du cube fournît de fortes étincelles. Et cependant, soit avant, soit après, soit pendant ces décharges successives, l'air intérieur ne donna aucun signe d'électrisation, les électroscopes n'accusèrent aucune espèce d'influence. L'absence de toute trace de tension électrique dans l'intérieur de ces conducteurs creux confirme l'exactitude des vues de M. Faraday, et pouvait être prévue à l'avance. En effet, l'air ambiant se polarise moléculairement par induction et retient, à la surface externe de ces *enveloppes conductrices*, la charge électrique communiquée. Mais les molécules de ces enveloppes, en raison même de leur conductibilité, ne peuvent pas conserver l'*état polaire*, et, par suite, ne peuvent pas transmettre, *de l'extérieur à l'intérieur*, l'action inductrice de cette charge. Dès lors, la térébenthine, l'air et les électroscopes enfermés dans ces enveloppes conservent leur *état neutre*, l'électricité reste localisée sur les couches les plus externes du système, et tout

se passe comme si la masse entière était *conductrice dans toute son épaisseur.*

Les expériences rapportées ci-dessus ont conduit M. Faraday à examiner un cas particulier et très intéressant de l'action inductrice. « Supposons, dit-il (1), un » globe métallique, creux, à l'état neutre, de 61 à 92 cen- » timètres de diamètre, isolé au milieu d'une chambre; » supposons, en outre, que l'intérieur du globe soit occupé » par des myriades de petites vésicules ou particules » chargées de la même électricité ou d'électricités diffé- » rentes, mais isolées les unes des autres et du globe lui- » même; leur action inductrice sera telle que la face » extérieure du globe sera chargée d'une quantité d'élec- » tricité égale à la somme *algébrique* de toutes les » charges des particules, et une portion quelconque du » globe (qui cependant n'a reçu *directement* aucune » charge électrique) fournira, à un corps placé dans le » voisinage, *une* étincelle aussi longue et aussi puissante » que si la somme *algébrique* des charges de toutes les » particules intérieures avait été transportée sur le globe » lui-même. » Il est évident d'ailleurs que, cette étincelle une fois obtenue, l'extérieur du globe ne doit plus donner aucun signe d'électrisation; car sa face interne est chargée d'une quantité d'électricité de nom contraire égale à celle qui existait primitivement sur sa surface externe, et il n'y a plus lieu à induction entre le globe et les particules électrisées qu'il contient. Tout doit donc se passer dans ce cas comme si, à l'aide d'une machine, on avait directement communiqué au globe une charge égale

(1) *Loc. cit.*, t. II, p. 283.

à la somme *algébrique* des charges des particules placées dans sa cavité. Cette prévision de la théorie de M. Faraday se trouve parfaitement justifiée par les deux expériences suivantes (1).

Un grand cube creux, plein d'air, à parois conductrices, était *isolé* dans une chambre. A travers les parois, il fit passer un fil métallique isolé à l'aide d'un tube de verre; ce fil fut mis en communication avec une puissante machine électrique. La machine fut mise en mouvement pour électriser l'air contenu dans l'intérieur du cube. La face extérieure du cube donna, dans toute son étendue, des signes évidents d'électrisation. Il établit alors une communication entre le cube et la terre, et continua à faire marcher la machine; puis le fil de communication de la machine avec l'air intérieur fut retiré et, en même temps le cube fut isolé. La face extérieure du cube ne fournit ultérieurement aucune trace d'électricité. La même expérience fut tentée en électrisant directement de l'huile de térébenthine renfermée dans une sphère métallique creuse isolée; dans ce dernier cas, les résultats furent les mêmes que dans l'expérience précédente.

Il paraît donc évident que, même dans le cas d'un corps *isolant* dont la surface *seule* serait conductrice, une charge électrique, communiquée à une partie de ce corps prise dans son intérieur, ne manifesterait sa présence que sur l'enveloppe extérieure, et produirait les mêmes effets que si elle avait été directement accumulée sur cette enveloppe conductrice. L'apparition de l'électricité sur la surface conductrice de ce corps isolant n'est pas due

(1) *Loc. cit.*, t. I, p. 365.

à un transport de fluide; c'est un simple résultat de l'action inductrice des particules isolantes électrisées exercée sur l'enveloppe conductrice par l'intermédiaire des particules polarisées de la portion non électrisée du corps isolant ou diélectrique.

M. Faraday a aussi essayé d'expliquer, dans sa théorie de l'induction, l'influence, bien manifeste et bien connue, de la forme des conducteurs sur la distribution de l'électricité à leur surface. Du moment qu'un corps est électrisé, l'induction entre en jeu et constitue immédiatement les corps environnants dans des états électriques contraires; il résulte de là que la charge du corps primitivement électrisé et les charges de nature contraire développées par induction sur les corps environnants, réagissent les unes sur les autres et s'attirent mutuellement. Rappelons-nous d'ailleurs que, entre deux points quelconques de deux corps en présence, l'action inductrice se propage, à travers l'air, suivant des lignes droites et suivant des lignes courbes. Cela posé :

Soit une sphère électrisée suspendue librement dans une chambre; à cause de la parfaite symétrie de sa forme, la somme des actions inductrices, soit en ligne droite, soit en ligne courbe, exercées sur les corps induits et la somme des réactions de ces corps environnants seront nécessairement les mêmes pour chacun des points de la surface de cette sphère. Il n'y a donc pas de raison pour que la tension électrique d'une sphère n'ait pas partout la même intensité.

Il n'en est pas de même d'un cylindre. Évidemment, dans ce cas, la somme des actions inductrices, en ligne

droite et en ligne courbe, exercées sur les corps environnants par un point pris à sa surface, ira croissant à mesure que le point considéré sera plus éloigné de la partie centrale et plus rapproché des extrémités du cylindre. Par conséquent, aussi, l'attraction des charges développées, par induction, sur les corps voisins se fera plus fortement sentir sur les extrémités du cylindre que sur tout autre point de sa surface; l'électricité devra se porter du côté où l'attire la plus forte somme des actions inductrices, et la tension deviendra et se maintiendra nécessairement plus considérable vers les extrémités que vers les parties centrales de la surface du cylindre. Les mêmes considérations s'appliquent à tous les cas considérés par Coulomb (page 44), et dans lesquels l'expérience démontre la tendance de l'électricité à s'accumuler vers les parties de la surface des conducteurs de forme allongée qui correspondent aux extrémités de leur plus grande dimension.

Quant aux conducteurs de forme conique, il est évident que la pointe qui les termine exerce et supporte une beaucoup plus grande somme d'actions inductrices que toute autre portion de leur surface. L'électricité communiquée à ces conducteurs doit donc affluer vers la pointe; on voit ainsi comment la tension devient assez considérable à l'extrémité du cône pour surmonter la résistance de l'air, et déterminer la dissémination de la charge dans l'espace.

Mouvements des corps légers. — La théorie de l'induction de M. Faraday fournit une explication très simple des mouvements que prennent les corps légers électrisés, quand ils sont assez rapprochés pour réagir les uns sur les autres.

Soit A (Fig. 50) une petite sphère conductrice de moelle de sureau isolée et chargée d'électricité négative. Si nous approchons un cylindre C de verre électrisé positivement ; par induction, une certaine quantité d'électricité négative se développe sur la face de A par laquelle cette sphère regarde le cylindre C, et s'ajoute à l'électricité de même nom qui existait déjà sur cette face. En même temps, une portion égale d'électricité positive se montre sur la face opposée de la sphère et y neutralise, en tout ou en partie, l'électricité négative qui s'y trouvait déjà. Finalement, la

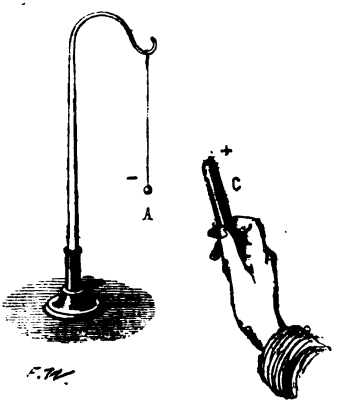


Fig. 50.

tension négative de la sphère A est plus considérable du côté du cylindre que du côté opposé. Par conséquent, la tension polaire des molécules d'air est plus forte entre A et C que dans toute autre direction. Ainsi plus fortement sollicitée vers C que vers tout autre point de l'espace, cette charge négative de la balle de moelle de sureau, ne

pouvant passer de la sphère A dans l'air qui l'environne, entraîne la sphère avec elle vers le cylindre positif, C, et, comme d'ailleurs l'action inductive de C sur A augmente à mesure que la distance diminue, la petite sphère prend, dans cette circonstance, un mouvement accéléré. Cette explication suppose nécessairement que, dans un espace plein d'air, l'électricité peut exercer une action mécanique sur les molécules des conducteurs. L'exactitude de cette interprétation est pleinement justifiée par les phénomènes de transport qui accompagnent les décharges électriques. Nous verrons en effet que, au moment où deux conducteurs échangent une étincelle, des particules matérielles sont violemment *arrachées* de leurs surfaces et entraînées dans le trajet du flux d'électricité.

Supposons maintenant que la sphère A, toujours électrisée négativement, soit une substance isolante quelconque. Nous savons que, sous l'influence du cylindre positif C, les molécules de la sphère se polarisent de manière que la face tournée vers C devient négative et la face opposée positive. Ici donc encore la tension négative de la petite sphère A est plus considérable du côté de C que dans toute autre direction, et cet état définitif de sa surface doit, comme dans le cas précédent, déterminer son mouvement de translation vers le cylindre positif C.

Soit maintenant A (Fig. 51) une petite sphère conductrice, isolée et chargée d'électricité positive. Si nous approchons le cylindre C électrisé positivement; par induction, la tension positive de A devient plus forte sur la face de cette sphère qui ne regarde pas C que sur la face tournée vers le cylindre. Alors, sous la double

influence de l'action répulsive de la charge positive du cylindre et de l'action attractive des charges négatives développées par induction sur les corps voisins, l'électricité de la sphère A et la sphère elle-même, dont elle ne peut pas se séparer, sont entraînées dans une direction qui

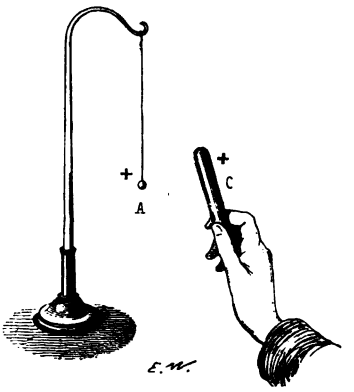


Fig. 51.

les éloigne du cylindre positif. Dans le cas où la sphère A est positive et non conductrice, on prouverait de la même manière qu'elle doit être repoussée par le cylindre inducteur positif.

Enfin, si l'on approche un cylindre électrisé d'une petite sphère isolée et à l'état neutre, la petite sphère se polarise par voie d'induction, et les deux corps en présence se regardent par des faces dont les tensions sont de signes contraires. De plus, la tension de la petite sphère est toujours plus forte sur la face tournée vers le cylindre inducteur que sur tout autre point de sa

surface. Dès lors, il est facile de voir que, dans ce cas, la sphère induite, qu'elle soit conductrice ou isolante, doit toujours être entraînée vers le cylindre inducteur.

ARTICLE V.

APPAREILS CONDENSATEURS.

Nous avons vu (page 29 et suiv.) que le contact de l'air est une cause incessante d'affaiblissement de la charge électrique accumulée à la surface des conducteurs, et que la quantité d'électricité perdue par cette voie reste une fraction constante de la charge elle-même, tant que les conditions atmosphériques ne changent pas. L'écoulement du fluide libre à travers l'air, augmentant ainsi proportionnellement à l'intensité de la charge, devient bientôt assez considérable pour contre-balancer l'effet de la machine électrique ; l'électricité répandue à la surface des conducteurs a atteint alors son *maximum de tension*, variable, d'ailleurs, avec l'état hygrométrique de l'atmosphère et la puissance de la machine. Il en résulte que, sur des surfaces d'étendue et de forme données, on ne peut accumuler, à l'aide des procédés précédemment indiqués, que des quantités assez faibles de fluide libre. En mettant à profit les propriétés des diélectriques, il est possible de construire des appareils dans lesquels, par voie d'induction, des charges très considérables d'électricité sont retenues sur des surfaces relativement peu étendues ; ces appareils sont connus sous le nom de *condensateurs*.

Soit M (Fig. 52) une sphère métallique isolée, creuse et remplie d'air. Au centre de cette sphère supposons une petite sphère C chargée d'électricité positive. Par l'intermédiaire de l'air, l'induction agit sur les parois de la

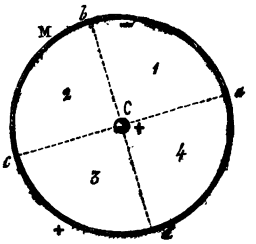


Fig. 52.

sphère M, de telle manière que sa surface interne et sa surface externe sont recouvertes, la première d'une charge négative, la seconde d'une charge positive; de plus, chacune de ces charges contraires, développées par induction, est égale à celle de la sphère inductrice C. Si nous mettons M en communication avec le sol, toute son électricité positive s'écoule dans le réservoir commun, sa surface externe ne donne plus aucun signe d'électrisation, mais sa surface interne conserve la charge négative développée et retenue par l'action inductrice de la sphère C. En outre, comme les deux sphères sont concentriques et que l'air est le seul diélectrique interposé, l'induction s'exerce dans toutes les directions avec la même intensité, et la charge négative est uniformément répandue sur la surface interne de la sphère induite M.

Partageons maintenant la cavité intérieure de la sphère

M en quatre secteurs, et supposons que le secteur 1 soit rempli de soufre, le secteur 2 de gomme laque, le secteur 3 de verre, et le secteur 4 d'air. L'action inductrice de la sphère C s'exerce à travers ces quatre diélectriques, et développe sur les surfaces externe et interne de la sphère M des charges d'électricité positive et d'électricité négative dont chacune est, comme dans le cas précédent, égale à la charge inductrice elle-même. Lorsque M est ensuite mis en contact avec le sol, et que sa surface extérieure se trouve ainsi ramenée à l'état neutre, la charge négative totale de sa surface interne conserve exactement la même valeur absolue que dans le cas où l'air était le seul diélectrique interposé; mais sa distribution n'est plus uniforme. En effet, le pouvoir inducteur du soufre est plus grand que celui de la gomme laque, ce dernier plus grand que celui du verre, et celui du verre lui-même l'emporte sur celui de l'air. Dès lors, les quatre segments *ab*, *bc*, *cd*, *da*, ne sont pas également influencés par la sphère C; l'action inductrice, que chacun d'eux éprouve, varie nécessairement dans le même sens que la capacité inductrice du diélectrique correspondant. La charge négative totale de la face interne de la sphère M est donc composée de quatre charges partielles, inégales, réparties, par ordre d'intensités décroissantes, sur les segments *ab*, *bc*, *cd*, *da*. La charge électrique de C éprouve nécessairement aussi, dans sa distribution à la surface de la sphère inductrice, des modifications correspondantes. Ces considérations démontrent que, si nous ne pouvons pas altérer la valeur *totale* de la force inductrice d'une charge déterminée, nous pouvons du moins, par une

disposition convenable des diélectriques interposés, détourner exclusivement, dans une direction choisie, une partie plus ou moins considérable de cette force, et concentrer, pour ainsi dire, son action sur une surface métallique déterminée. Ce principe est la base de la théorie de tous les condensateurs.

Condensateur à plateaux. — Soient A et B (Fig. 53) deux plateaux métalliques, circulaires, à bords arrondis, portés sur des pieds isolants, et munis, à leur face posté-

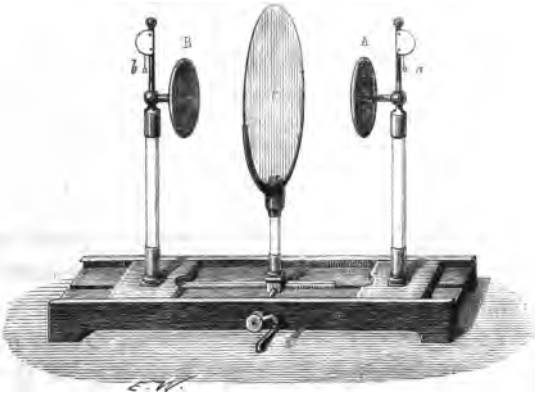


Fig. 53.

rieure, de petits pendules *a*, *b*, de moelle de sureau. C est une plaque de verre mince qui reste toujours placée entre les deux plateaux. Les pieds des deux plateaux sont munis de crémaillères qui permettent de les rapprocher ou de les éloigner à volonté. L'ensemble de ces deux plateaux métalliques séparés par la lame isolante de verre représente une des formes du *condensateur* électrique. Nous

appellerons *antérieures* les faces des plateaux tournées vers la lame de verre.

Les plateaux étant assez rapprochés (Fig. 54) pour n'être séparés que par la lame de verre, on fait communiquer A avec le conducteur d'une machine électrique.

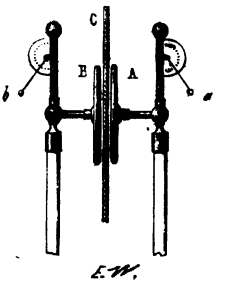


Fig. 54.

Ce plateau se charge d'électrité positive; quand il est en équilibre de tension avec le conducteur de la machine, on rompt la communication. Par induction, le fluide neutre de B est décomposé, l'électricité négative se porte sur la face antérieure de ce plateau, la positive sur sa face opposée; les pendules *a* et *b* accusent, par leur divergence, la présence des fluides libres. Si, alors, on éloigne les plateaux, le pendule *a* continue à diverger, mais le pendule *b* retombe à zéro; le plateau B, en effet, n'ayant rien gagné ni perdu dans cette opération et n'étant électrisé que par induction, doit reprendre *son état neutre primitif* dès qu'il est reculé à une grande distance de A.

Il suffit de rapprocher les plateaux et de leur rendre leur position primitive pour que B soit, de nouveau, élec-

trisé par induction, et pour que les deux pendules *a*, *b* divergent à la fois. Les choses étant ainsi disposées, si l'on met le plateau B en communication avec le sol, son fluide positif s'écoule tout entier dans le réservoir commun, le pendule *b* retombe à zéro et la divergence de *a* diminue considérablement. Cependant A n'a rien perdu de son électricité positive, et B possède encore toute l'électricité négative provenant du fluide neutre décomposé, par induction à sa surface. Pour le prouver, on n'a qu'à éloigner les deux plateaux; le pendule *a* reprend sa divergence primitive, et le pendule *b* diverge aussi, accusant, sur le plateau B, la présence d'une charge négative *inférieure* à la charge positive de A. Que se passe-t-il dans cette opération?

Le plateau A, électrisé positivement, agit par induction sur tous les conducteurs environnants à travers les diélectriques avec lesquels il est en rapport, et développe, à leur surface, une charge totale d'électricité négative égale à sa charge positive. Mais son action n'a pas la même intensité dans toutes les directions, elle est plus forte à travers le verre qu'à travers l'air; d'ailleurs le plateau B est plus rapproché de A que tous les autres conducteurs; pour cette double raison, la majeure partie de la force inductrice de la charge positive de A se trouve détournée et concentrée vers la lame de verre, polarise ses molécules et décompose le fluide neutre du plateau B. Dès que l'électricité positive de B est écoulée dans le sol, son électricité négative, qui représente la somme d'action inductrice éprouvée par ce plateau, est retenue sur sa face antérieure par les molécules polarisées de la lame de verre.

De l'autre côté, ces molécules polarisées du verre retiennent, sur la face antérieure du plateau A, une charge correspondante d'électricité positive. Ces deux charges positive et négative, liées l'une à l'autre par l'état polaire du diélectrique interposé, c'est-à-dire par l'induction, ne produisent plus d'effet sensible de tension sur les faces postérieures des plateaux; mais elles n'ont pas perdu leur tension, elles ne sont ni *dissimulées* ni *latentes* comme on a coutume de le dire; leur tension existe sans aucun affaiblissement, seulement elle ne s'exerce plus que dans une seule direction, et cette direction est celle de la polarisation des molécules du verre ou de l'action inductrice elle-même. A la face postérieure du plateau B, le pendule *b* est retombé à zéro, parce qu'il n'y a plus trace de tension électrique sur cette face. Mais, à la face postérieure du plateau A, le pendule *a* conserve une faible divergence, parce qu'une faible portion de la charge positive de A continue à exercer son action inductrice, à travers l'air, sur les conducteurs environnants, et entretient une tension sensible dans cette direction.

Mais la face postérieure du plateau A n'est plus en équilibre de tension avec le conducteur de la machine; si nous rétablissons momentanément la communication, ce plateau reçoit une nouvelle charge d'électricité positive qui, ajoutée à la portion de la première dont l'action se fait sentir sur le pendule *a*, rétablit l'équilibre de tension et rend à ce pendule sa divergence primitive. En même temps, le pendule *b* s'écarte de sa position verticale, accusant la décomposition, par induction, d'une nouvelle dose de fluide neutre sur le plateau B. Si nous faisons,

alors, communiquer B avec le sol, son électricité positive s'écoule dans le réservoir commun, le pendule *b* retombe à zéro, et la divergence de *a* diminue considérablement, de manière cependant à rester plus forte qu'après la première épreuve. Dans ce second temps de l'opération, la succession de phémonènes est la même que dans le premier. Cette seconde charge positive ajoutée au plateau A s'est divisée en deux parts fort inégales ; l'une, la plus considérable, ne produit aucun effet de tension sur sa face postérieure, agit exclusivement par induction sur le plateau B à travers la lame de verre, et retient, sur sa face antérieure, une charge négative équivalente; l'autre, induit à travers l'air les conducteurs environnants et s'ajoute à la fraction correspondante de la première charge pour faire diverger le pendule *a*. Le plateau A, n'étant pas, par sa face postérieure, en équilibre de tension avec la machine, peut recevoir une troisième charge positive, mais plus petite que la seconde, qui elle-même était plus faible que la première.

Par la répétition de ces alternatives de communication du plateau A et du plateau B, d'une part avec la machine, et d'autre part avec le sol, le plateau A reçoit de la machine une série de charges positives de force décroissante, et l'induction appelle et retient, sur le plateau B, une série correspondante de charges négatives. Les conditions de distance des plateaux métalliques, d'épaisseur de la lame de verre et de position des conducteurs environnants restant les mêmes, c'est d'une part *la même fraction* de la charge positive communiquée au plateau A à chaque épreuve dont l'action est exclusivement détournée vers le

plateau B à travers le verre, c'est d'autre part *la même fraction* de cette charge positive qui reste libre d'agir, à travers l'air, sur les conducteurs environnants. Toutes les actions inductrices partielles, exclusivement détournées vers le plateau B, s'ajoutent et augmentent graduellement les tensions polaires des molécules de la lame de verre; d'un autre côté, les actions dirigées en sens inverse à travers l'air s'ajoutent aussi, et finissent par constituer, sur la face postérieure du plateau A, une tension positive égale à celle de la machine et accusée par la divergence du pendule *a*. Le condensateur a, alors, acquis son *maximum* de charge, il est *saturé*.

Au lieu de procéder par charges successives, on peut établir les plateaux A et B en communication perma-

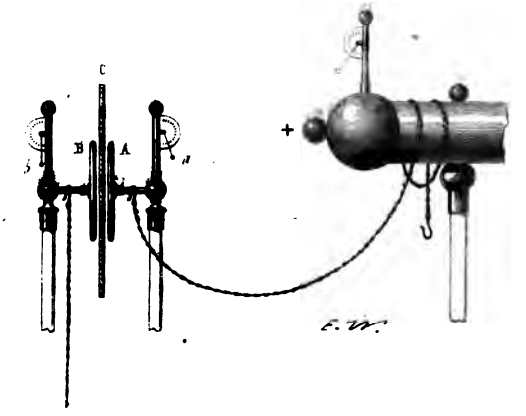


Fig. 55.

nente, d'une part avec le conducteur de la machine, et d'autre part avec le sol (Fig. 55). Dans ce cas, le pendule *a*

du plateau inducteur A et le pendule de la machine s'écartent graduellement de la verticale, tandis que le pendule *b* du plateau induit B reste fixe à zéro. Quand le degré d'écartement du pendule *a* est égal à celui qu'aurait atteint le pendule de la machine séparée du condensateur, l'appareil est à son *maximum* de charge.

Dans cet état final de l'appareil, la charge positive *totale* du plateau inducteur A, ou *plateau collecteur*, est de beaucoup supérieure à celle qu'aurait pu lui communiquer la machine si ce plateau avait été électrisé *seul et hors de la présence de* B. Les actions inductrices que cette charge positive exerce autour d'elle, tant en ligne droite qu'en ligne courbe, se composent de deux portions fort inégales. L'une, la plus grande en raison du voisinage de B et de la capacité inductrice du verre, agit exclusivement sur ce dernier plateau et retient, à sa surface, une charge négative, correspondante dont la tension est tout entière dirigée vers le plateau A ; l'autre au contraire, la plus faible, agit, à travers l'air, sur les conducteurs environnants et constitue la tension du plateau A dans cette direction. La lame de verre polarisée moléculairement est placée entre deux tensions de signes contraires dirigées, l'une du plateau A au plateau B, et l'autre en sens inverse ; ces deux tensions opposées doivent être égales pour que les molécules polarisées du verre interposé soient dans un état d'équilibre. Ces deux tensions opposées restent ainsi en présence sans se neutraliser, maintenues par leur induction réciproque et par la résistance que les molécules du verre opposent à la destruction de leur état polaire par voie d'échange d'électricité.

Dans cette succession d'opérations, le plateau collecteur A joue le rôle d'inducteur ; la charge positive qu'il reçoit de la machine exerce son action inductrice dans toutes les directions, seulement elle agit plus fortement du côté du plateau B que vers les autres conducteurs environnants. La charge négative du plateau B est due tout entière à cette action inductrice de A, elle est tout entière retenue sur la face antérieure du plateau B. La charge positive *totale* de A l'emporte donc sur la charge négative développée et retenue sur B par induction.

Le condensateur étant chargé, le pendule *b* à zéro et le pendule *a* écarté de la verticale, mettons le plateau A en communication avec le sol, en laissant le plateau B isolé. Dans ce cas, c'est la charge *négative* de B qui joue le rôle de charge *inductrice*, et c'est le plateau A qui est soumis à l'induction. L'induction de la charge négative de B s'exerce dans toutes les directions ; seulement, à cause de la présence de la lame de verre et de la position très rapprochée du plateau A, elle agit plus fortement sur ce dernier conducteur que sur tous les autres corps environnants. Immédiatement, une partie de la charge positive de A s'écoule dans le sol, il ne reste sur A que la quantité d'électricité que la charge négative de B peut retenir par induction. L'électroscope *a* tombe à *zéro*, tandis que l'électroscope *b* diverge et accuse une tension négative sur la face postérieure de B. Dans ce nouvel état d'équilibre, la charge négative *totale* de B, jouant le rôle de charge inductrice et exerçant son action sur tous les corps environnants et dans toutes les directions, l'emporte sur la charge positive de A qui conserve seulement

la quantité d'électricité que l'induction de B peut retenir sur sa face antérieure. Si, après avoir de nouveau isolé le plateau A, on met le plateau B en communication avec le sol, les plateaux changent de rôle; le plateau *induit* B perd une partie de sa charge négative, et conserve sur sa face antérieure une quantité d'électricité inférieure à la charge positive *inductrice* du plateau A; le pendule *b* retombe à zéro, et le pendule *a* accuse, par sa divergence, un état de tension sur la face postérieure de A. En mettant, ainsi, alternativement chacun des deux plateaux métalliques en communication avec le sol, tandis que l'autre reste isolé, on fait passer chaque fois, dans le réservoir commun une partie de la charge *totale* de l'appareil, et l'on finit par épuiser complétement l'électricité accumulée sur les plateaux. Cette opération, dans laquelle on ramène le condensateur à son état neutre graduellement et par voie de *décharges partielles et successives*, est la contre-partie du procédé des *charges successives* que nous avons exposé plus haut.

Force condensante. — On appelle *force condensante* de l'appareil le rapport de la charge *totale* que la machine peut communiquer au plateau A quand il fait partie du condensateur, à celle qu'acquerrait ce même plateau A isolé et hors de la présence du plateau B.

Cette force condensante doit nécessairement varier avec la nature de l'isolant placé entre les deux plateaux métalliques, et augmenter avec la capacité inductrice de ce diélectrique.

Cette force condensante doit aussi augmenter à mesure que la distance des deux plateaux métalliques, ou l'épais-

seur du diélectrique interposé, devient moins considérable. M. Riess (1), dans ses recherches sur la théorie du condensateur, a démontré l'exactitude de cette proposition. Il résulte de ses expériences que, pour de *petites distances* des deux plateaux, les forces condensantes varient à peu près en raison inverse des distances; la variation est beaucoup moins rapide dès que la distance est un peu grande. D'après cela, il semble qu'il est possible d'augmenter indéfiniment la *force condensante* d'un appareil, puisqu'on dispose toujours des dimensions transversales de la lame isolante employée. Mais il est nécessaire de conserver à ce corps isolant une certaine épaisseur; sans cela, la résistance qu'il oppose au passage de l'électricité serait insuffisante pour faire équilibre aux tensions opposées des charges positive et négative; il serait brisé par une décharge spontanée, dirigée, à travers sa propre substance, d'une face à l'autre. Cet accident est assez fréquent pour que, dans la pratique, on doive éviter de pousser la charge du condensateur jusqu'à *saturation* complète. Dans le condensateur, les charges ne sont donc ni *latentes* ni *dissimulées*; elles n'ont perdu aucune de leurs propriétés caractéristiques, seulement leurs effets d'induction et de tension sont détournés, en très grande partie, dans une direction déterminée.

Puisque, au moment de la saturation, le plateau A est en équilibre de tension avec la machine électrique, il est évident que, la force condensante de l'appareil restant la même, la quantité d'électricité accumulée sera d'autant

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 1854; t. XLII, p. 376.

plus considérable que la machine sera elle-même capable d'atteindre une plus haute tension.

Chargeons le condensateur. Soit t la tension accusée par le plateau collecteur A pendant qu'il fait partie de ce condensateur ; séparons rapidement le plateau A de l'appareil, et soit T la tension de *sa charge totale* quand il ne fait plus partie du condensateur. D'après ce que nous avons dit, en désignant par f la *force condensante* de l'appareil, nous aurons, entre ces trois quantités, la relation suivante :

$$f = \frac{T}{t}, \text{ d'où } T = f.\ t.$$

Il résulte de là que, dans un même condensateur, la tension *totale* T de la charge accumulée sur le plateau *collecteur* à un moment quelconque de l'opération est toujours proportionnelle à la tension t accusée par ce plateau. Dans ce cas, en effet, l'épaisseur et la nature du diélectrique restant les mêmes, la valeur de f est constante. Pour connaître les rapports des charges *totales* successivement communiquées à un même condensateur, il suffira donc de déterminer, à la balance de Coulomb, les rapports des tensions accusées par le plateau collecteur de l'appareil.

M. Riess, opérant avec un condensateur à plateaux, a prouvé que la *force condensante* est toujours plus faible sur les bords que sur les parties centrales de l'appareil, et que le rapport de la *force condensante* du centre à celle des bords est d'autant plus grand que les plateaux sont plus rapprochés. Ces résultats sont parfaitement d'accord avec ce que nous savons de l'induction et de son mode

d'action. En effet, l'action inductrice d'une portion quelconque de la charge du plateau collecteur A est d'autant plus facilement détournée vers le plateau B qu'elle est moins fortement sollicitée dans d'autres directions. Or, par le seul fait de sa position, l'électricité des bords du plateau A est en rapport d'action inductrice avec une plus grande étendue de l'espace environnant que celle des parties centrales ; il est donc naturel que la *fraction* de charge, dont l'induction est exclusivement détournée vers le plateau B, soit plus faible sur les bords que partout ailleurs. D'un autre côté, comme le rapprochement des plateaux limite beaucoup les rapports d'induction des parties centrales de A avec les corps environnants et n'affecte que faiblement ceux des parties marginales, la *force condensante* du centre doit augmenter beaucoup plus rapidement que celle des bords quand la distance des plateaux diminue.

Les observations de M. Riess démontrent encore que la force condensante est d'autant plus considérable, que la surface des plateaux employés est elle-même plus étendue. Ces résultats sont une conséquence de l'affaiblissement que la *force condensante* éprouve vers les parties marginales. En effet, dans les plateaux circulaires, les surfaces augmentent dans le rapport des carrés des rayons, tandis que les circonférences n'augmentent que dans le rapport des rayons ; la *force condensonte* doit donc être plus forte avec de grands plateaux qu'avec des plateaux de faible étendue, parce que l'influence des parties marginales se fait moins sentir dans les premiers que dans les seconds.

Enfin, M. Riess a déterminé directement, dans le même travail, la *force condensante* de ses appareils ; ses résultats diffèrent beaucoup des valeurs fournies par l'expression algébrique très simple qui, dans l'hypothèse de l'électricité *latente* ou *dissimulée* (1), représente cette *force*. Or comme, cette hypothèse une fois acceptée, il serait difficile de contester l'exactitude des raisonnements qui conduisent à cette formule, les expériences de M. Riess s'accordent avec les recherches de M. Faraday pour démontrer que la théorie de l'*électricité latente* est inexacte et désormais inadmissible.

Condensateur de Volta. — Cet appareil se compose

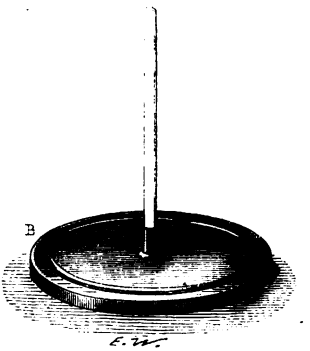


Fig. 56.

(Fig. 56) d'un disque de bois B dont la face supérieure est recouverte de taffetas gommé, et d'un plateau métallique

(1) Dans la note B, à la fin de la première section, nous avons exposé la théorie du condensateur dans l'hypothèse de l'*électricité latente*, et les raisonnements qui conduisent à la formule de la *force condensante*.

muni d'un manche isolant. Le taffetas remplit l'office de corps isolant ou diélectrique interposé; il s'oppose à la combinaison des deux électricités de nom contraire accumulées sur les deux plateaux. Le disque de bois communiquant avec le sol, on place le plateau métallique sur le taffetas gommé et on le met en rapport avec une source électrique. L'électricité de la source se répand sur le plateau métallique qui joue le rôle de *collecteur*, agit par induction, à travers le taffetas, sur le disque de bois et retient, sur sa face supérieure, une charge correspondante d'électricité de nom contraire. Ces deux charges de signes contraires réagissent l'une sur l'autre comme dans tous les condensateurs, et de nouvelles doses d'électricité se condensent sur le plateau métallique jusqu'à ce que sa tension soit la même que celle de la source électrique observée. Quand le plateau A est chargé, on l'enlève par le manche isolant; il suffit, alors, de le présenter à un électroscope, pour déterminer la nature de l'électricité qui lui a été communiquée.

Fig. 57.

Bouteille de Leyde. — La bouteille de Leyde est le plus important de tous les condensateurs. Elle se compose (Fig. 57) d'un flacon de verre de faible épaisseur, fermé avec un bouchon de liége bien sec, à travers lequel passe une tige métallique T recourbée à sa partie supérieure et terminée par une boule. A l'extérieur, la surface du flacon est recouverte, dans ses deux tiers ou ses trois quarts inférieurs, d'une

lame métallique B qui prend le nom de *garniture* ou *armure extérieure*. L'intérieur du flacon est tapissé d'une lame métallique qu'on appelle la *garniture* ou *armure intérieure*. Cette armure intérieure doit communiquer avec la tige T; on peut aussi employer, pour garniture intérieure, des feuilles d'or ou de clinquant, de la grenaille de plomb, de l'eau, ou tout autre corps conducteur introduit dans le flacon. Le bouchon et la partie de la surface extérieure du verre qui n'est pas recouverte par la feuille métallique sont enduits d'une couche mince de vernis à la gomme laque, afin que les deux garnitures restent bien isolées l'une de l'autre. Il est facile de voir que les deux armures de la bouteille de Leyde représentent exactement les plateaux métalliques du condensateur à plateaux. Seulement, ici, la garniture intérieure, qui sert à mettre l'appareil en communication avec la machine électrique, n'a de rapports d'action inductrice avec les corps étrangers au condensateur que par la surface très limitée de la tige T; par conséquent, dans la bouteille de Leyde, la fraction d'action inductrice de la charge communiquée qui est détournée exclusivement vers la garniture extérieure devient très considérable. Pour des surfaces métalliques d'égale étendue, la force condensante et la charge finale acquièrent donc, dans la bouteille de Leyde, de plus grandes valeurs que dans un condensateur à plateaux.

Pour charger une bouteille de Leyde, on la suspend (Fig. 58), par le crochet de la tige T, au conducteur de la machine électrique, puis on fait communiquer l'armure extérieure avec le sol au moyen d'une chaîne métallique

attachée à un crochet C fixé sur le fond de l'appareil. L'électricité de la machine se répand sur la tige T, de là sur l'armure intérieure, décompose, par induction, le fluide neutre de l'armure extérieure, retient le fluide négatif et

Fig. 58.

repousse le positif dans le sol. Les deux électricités contraires s'accumulent sur les armures par le mécanisme que nous avons exposé plus haut à propos du condensateur à plateaux. Quand la bouteille est chargée à saturation, la tige T qui fait partie de la garniture intérieure est en équilibre de tension avec la machine; quant à la charge négative de la garniture extérieure, sa tension, complétement détournée vers la charge positive intérieure, ne se

révèle au dehors par aucun effet sensible. On peut, alors, sans rien lui faire perdre de sa charge finale, saisir la bouteille de Leyde par son armure extérieure et la détacher de la machine.

Présence des électricités contraires sur les armures de la bouteille de Leyde. — La présence de l'électricité positive sur la garniture intérieure et de l'électricité négative sur la garniture extérieure, peut être démontrée directement par une expérience fort élégante. On saisit, par la garniture extérieure, une bouteille de Leyde chargée, et, avec la boule du crochet de la tige métallique qui communique avec la garniture intérieure, on trace des lignes ou des dessins *a* (Fig. 59).

Fig. 59.

sur la surface du gâteau de résine P. On dépose la bouteille sur un isoloir, on la saisit par sa tige métallique T, et, avec la garniture extérieure, on trace, sur la surface du plateau, de nouvelles lignes ou de nouveaux dessins *b*. La résine prend les électricités des garnitures et les retient sur les points où elles ont été déposées. A l'aide d'un petit soufflet S, on projette, sur le gâteau de résine, un mélange de minium et de soufre en

poudre. Par l'agitation, le soufre s'électrise négativement et le minium positivement. La première de ces deux poudres se fixe sur les lignes tracées, en *a*, avec la garniture intérieure et les colore en *jaune;* tandis que la poudre *rouge* de minium se fixe sur les lignes *b* chargées de l'électricité négative déposée par la garniture extérieure de la bouteille. Cette expérience porte le nom de *Leichtemberg*, physicien allemand, qui l'a imaginée.

Décharge de la bouteille de Leyde. — Plaçons une bouteille de Leyde chargée (Fig. 60) sur un support isolant, faisons communiquer ses deux garnitures avec deux

Fig. 60.

électroscopes isolés aussi. D'abord l'électroscope *a* diverge seul, tandis que l'électroscope *b* est à zéro. Si l'on touche la boule A avec le doigt, d'après ce que nous avons dit (page 128), à propos du condensateur à plateaux, la garniture intérieure perd une partie de sa charge, le pendule *a* tombe à zéro, en même temps le pendule *b* diverge et accuse une tension négative sur la garniture extérieure. Si, alors, on touche la garniture extérieure avec le doigt, une partie de sa charge négative s'écoule dans le sol, le

pendule *b* tombe à zéro et, en même temps, le pendule *a* recommence à diverger. En touchant ainsi, *alternativement* et *isolément*, les deux garnitures, on affaiblit peu à peu la charge totale, et l'on finit par faire disparaître toute l'électricité accumulée sur les garnitures de l'appareil.

C'est, par le même mécanisme de *décharges successives*, que se dissipe l'électricité de la bouteille à carillon (Fig. 61). Une sphère métallique B est suspendue, au

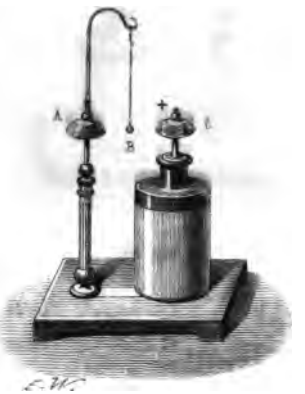


Fig. 61.

moyen d'un fil de soie, entre deux timbres dont l'un, C, communique avec la garniture intérieure, et l'autre, A, avec la garniture extérieure. La sphère B, d'abord attirée et puis repoussée par le timbre C, oscille de C en A et de A en C ; il en résulte une suite de décharges successives et partielles qui finissent par opérer la recomposition des fluides accumulés sur les deux armures.

On remplace quelquefois la sphère métallique par un morceau B′ de moelle de sureau, noirci et taillé de manière à représenter le corps d'une araignée dont les pattes sont figurées par des brins de soie (Fig. 62). Cette moelle

Fig. 62.

de sureau prend le nom d'*araignée électrique*, oscille du bouton C′ à la sphère A′, et finit par décharger complétement la bouteille de Leyde.

L'électricité de la bouteille de Leyde peut aussi se dissiper peu à peu par voie de *décharge spontanée*. Abandonnons au contact de l'air une bouteille de Leyde chargée et placée sur un tabouret isolant (Fig. 63). D'abord, l'électroscope *a*, en communication avec la garniture intérieure, diverge *seul* en vertu de la portion d'électricité de cette armure qui exerce son action inductrice, à travers l'air, sur les conducteurs environnants. Peu à peu cette électricité s'écoule dans l'atmosphère, et la divergence de

l'électroscope *a* diminue. Mais, du moment que la charge intérieure s'affaiblit, une partie de la charge de l'armure extérieure produit des effets de tension au dehors, et *b* diverge à son tour. Bientôt la divergence est la même pour les deux électroscopes, les tensions *extérieures* des deux

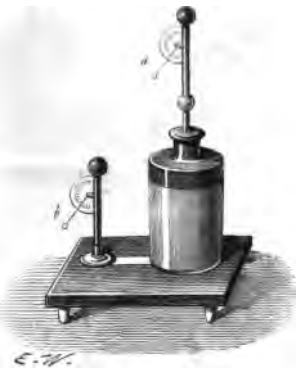


Fig. 63.

armures sont alors d'égale valeur et de signes contraires. A partir de ce moment, les deux électricités s'écoulent, à la fois et en quantités égales, à travers l'air ambiant; la charge de la bouteille s'affaiblit lentement et finit par s'épuiser complétement.

Pour décharger la bouteille *instantanément*, on se sert de l'*excitateur électrique* (Fig. 64). C'est une espèce de pince composée de deux branches métalliques P, P′, terminées par des sphères et munies de manches isolants M, M′. L'extrémité de la branche P étant en contact avec un point de l'armure extérieure, on approche l'extrémité de la branche P′ du bouton A de l'armure

intérieure. Au moment où la distance du bouton A à l'extrémité de P′ est assez faible pour que la résistance de la couche d'air interposée ne puisse plus faire équilibre aux

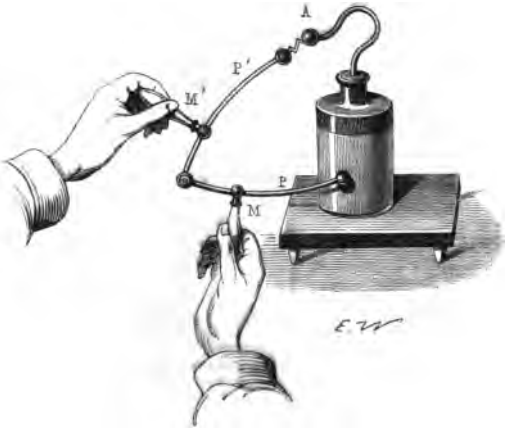


Fig. 64.

tensions des charges des deux armures, les électricités s'élancent l'une vers l'autre, et l'appareil retombe à l'état neutre. Cette décharge *instantanée* est accompagnée d'un claquement sec et d'une étincelle dont le volume est en rapport avec l'intensité de la charge du condensateur.

Les charges du condensateur pénètrent en partie dans le diélectrique. — Dans le vase conique de fer-blanc B (Fig. 65), plaçons le vase de verre C, et dans ce dernier, introduisons un cône tronqué de fer-blanc A; l'ensemble de ces trois pièces représente une véritable bouteille de Leyde à garnitures mobiles. Cette bouteille est chargée et déposée sur un plateau isolant. Enlevons, alors, l'ar-

mure intérieure A et mettons-la en communication avec le sol, enlevons le vase de verre C, enfin mettons la garniture extérieure B en communication avec le sol; cela fait,

Fig. 65.

recomposons la bouteille de Leyde. Bien que les armures aient été complétement et *isolément* ramenées à zéro, cependant l'appareil donne encore une forte décharge quand on fait communiquer les deux garnitures avec un excitateur. Cette expérience démontre que la majeure partie des charges positive et négative n'existe pas sur les armures elles-mêmes; elle ne peut évidemment se trouver que sur les surfaces où dans l'épaisseur du vase de verre C. Les recherches de M. Faraday (1) démontrent que, dans tout condensateur, sous l'influence de l'action inductrice, les charges positive et négative pénètrent, en partie, dans le diélectrique interposé aux deux armures métalliques.

Soit C (Fig. 66) un prisme rectangulaire de gomme laque garni de deux armures métalliques *a* et *b* communiquant, l'une avec le conducteur d'une machine électrique et l'autre avec le sol. Ce condensateur est chargé,

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 387 à 391.

puis isolé. Avec un excitateur, on fait communiquer les deux garnitures, la décharge a lieu avec étincelle. Si, *immédiatement* après la décharge, on examine les garni-

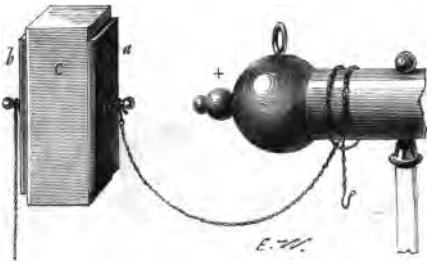


Fig. 66.

tures *a* et *b*, on les trouve complétement *neutres*. Mais, si l'on abandonne l'appareil isolé à lui-même, au bout d'un certain temps on trouve, sur les armures *a* et *b*, des charges électriques de *retour* plus faibles et de même nature que les charges primitives. On obtient des résultats semblables avec un corps isolant quelconque placé entre deux armures métalliques.

Soient maintenant D (Fig. 67) une lame de spermaceti garnie sur une face d'une feuille métallique *a* en communication avec le conducteur de la machine électrique, et C une lame semblable de spermaceti garnie aussi d'une feuille métallique *b* en communication avec le sol. On accole ces deux lames de spermaceti l'une à l'autre par leurs *faces nues*, et, après avoir chargé l'appareil, on l'isole et l'on fait communiquer les armures avec un excitateur. Si, alors, on sépare rapidement la lame C de la lame D, on trouve de l'électricité positive de *retour* sur la garniture *a* et de l'électricité négative sur la garniture *b*.

Des nombreuses expériences que M. Faraday a faites sur ce sujet, nous nous contenterons de citer les deux précédentes; mais, pour en faire comprendre toute la portée, il nous semble nécessaire de les accompagner de deux

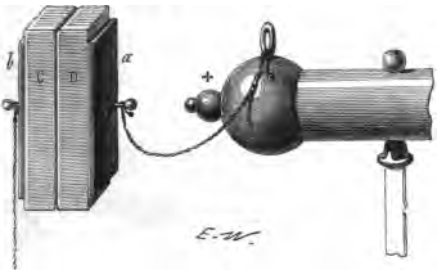


Fig. 67.

remarques importantes. D'une part, avec le même condensateur, les quantités d'électricité de *retour*, qui se montrent sur les armures, sont d'autant plus considérables que l'appareil reste plus longtemps chargé avant que ses garnitures soient mises en communication. D'autre part, avec le condensateur de la figure 66 dont toutes les pièces, après la communication des garnitures métalliques, sont maintenues dans leurs positions relatives, on trouve que les deux armures sont à l'état *neutre*, si on les examine *immédiatement après la décharge;* c'est seulement *au bout d'un certain temps* que se montrent les charges de retour. En présence de ces faits, il est difficile de ne pas admettre que, sous l'influence de l'action inductrice des deux armures, une partie de la charge positive et de la charge négative pénètre dans l'intérieur des corps isolants employés dans la construction des condensateurs.

Cette pénétration de l'électricité est mise hors de toute contestation possible par les expériences suivantes de M. Matteucci (1).

Après avoir chargé un condensateur formé d'un gros cube C de spermaceti armé sur ses deux faces opposées (Fig. 68), il l'a déchargé et a enlevé les deux garnitures

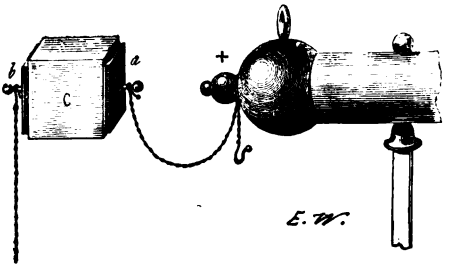


Fig. 68.

métalliques. Avec une lame de verre, il a alors pratiqué des sections dans le cube de spermaceti. Il a trouvé ainsi que, jusqu'à une certaine profondeur, les surfaces de toutes les sections pratiquées du côté de l'armure *a* étaient *positives*, tandis que les surfaces des sections pratiquées du côté de l'armure *b* étaient *négatives*.

Il a ensuite formé (Fig. 69) une pile C de lames de mica qu'il a armée de feuilles métalliques sur ses deux faces opposées. Après avoir chargé ce condensateur, il l'a déchargé, et puis il a enlevé les garnitures métalliques. Il a trouvé alors que, jusqu'à une certaine profondeur, les lames de mica prises du côté de l'armure *a* étaient

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1849, t. XXVII, p. 162.

positives sur leurs deux faces, tandis que les lames prises du côté de la garniture *b* étaient *négatives* sur leurs deux faces.

Cette pénétration évidente de l'électricité dans l'intérieur du spermaceti, du mica, du verre, de la gomme

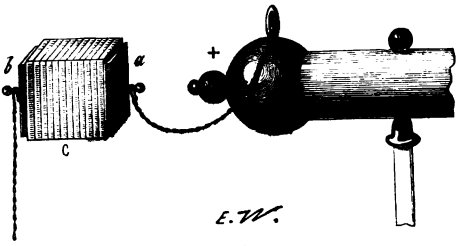


Fig. 69.

laque, du soufre, sous l'influence de l'action inductrice, prouve que la résistance de ces corps au passage de l'électricité n'est pas absolue, et que les substances considérées comme les plus isolantes possèdent toutes un certain degré de *conductibilité*. Ajoutons enfin que les expériences de M. Matteucci tendent à démontrer que l'électricité *négative* pénètre plus facilement que la *positive* dans l'intérieur des corps isolants.

Décharges secondaires. — Lorsqu'après avoir déchargé une bouteille de Leyde, on la laisse abandonnée à elle-même; si, au bout d'un certain temps, on met de nouveau les garnitures métalliques en communication, on obtient une seconde étincelle moins forte que la première. Les faits précédents nous dispensent d'insister plus longuement sur ces *décharges secondaires*, qui sont évidemment une conséquence inévitable de la pénétration d'une partie

des deux charges électriques dans l'intérieur des corps isolants placés entre les garnitures métalliques des condensateurs. Les *batteries électriques* composées de plusieurs grosses bouteilles de Leyde donnent quelquefois des *décharges secondaires* très intenses.

Rôle des armures. — Bien que, dans le condensateur,

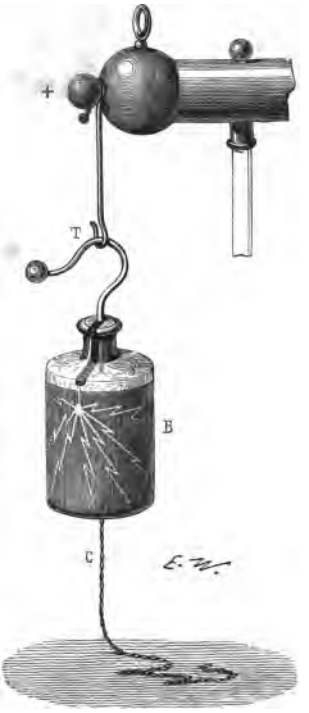


Fig. 70.

la majeure partie de l'électricité soit à la surface ou dans les couches superficielles du diélectrique placé entre les deux

garnitures métalliques, cependant les armures jouent un rôle important dans la décharge; elles servent à relier, par de bons conducteurs, tous les points de chacune des deux surfaces du diélectrique, et à leur permettre de se décharger tous à la fois à travers l'arc de communication. La bouteille de Leyde *étincelante* peut servir à mettre en évidence ce rôle des garnitures. Cet appareil est (Fig. 70) une bouteille de Leyde ordinaire dans laquelle, à la feuille métallique qui forme ordinairement la garniture extérieure, on a substitué des fragments de clinquant très rapprochés les uns des autres et fixés, au moyen d'un vernis, à la surface du verre. A la tige T est fixée une bande métallique qui rampe sur la face externe de la bouteille et s'arrête à une faible distance de la garniture extérieure B. Quand la tension intérieure a acquis une intensité suffisante, la bouteille se décharge spontanément et l'armure extérieure est sillonnée par des traits de feu partis de tous les points de la surface de la bouteille. Ces traits de feu accusent un mouvement de l'électricité qui passe d'un fragment métallique à l'autre pour se porter vers le point sur lequel a commencé la décharge.

Charge par cascade. — Avec une seule machine électrique, on peut charger à la fois plusieurs bouteilles de Leyde. Pour cela, on les dispose en série (Fig. 71): la première est directement accrochée à la machine comme à l'ordinaire; la seconde est suspendue, par la tige recourbée de son armure intérieure, au crochet de l'armure extérieure de la première, et ainsi de suite jusqu'à la dernière dont l'armure extérieure est mise directement en communication avec le sol. Le fluide positif de la machine

s'accumule sur l'armure intérieure de la première bouteille, décompose par influence l'électricité neutre de sa garniture extérieure, retient le fluide négatif, et chasse

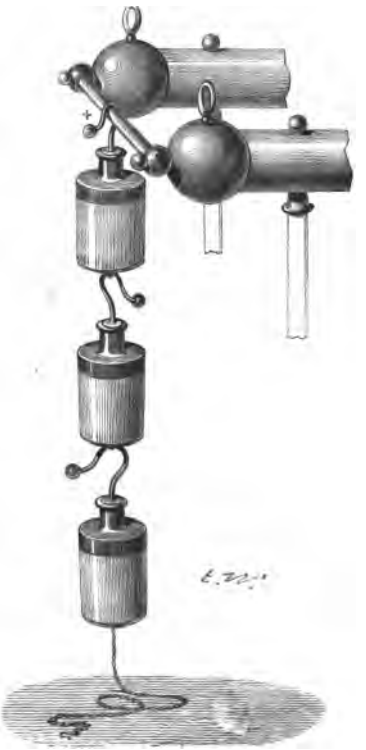


Fig. 71.

le fluide positif qui passe dans l'armure intérieure de la seconde; à son tour, le fluide positif, développé par induction sur l'armature extérieure de la seconde bouteille, passe

sur l'armure intérieure de la troisième, et ainsi de suite jusqu'à la dernière, qui laisse écouler dans le sol le fluide positif développé, par induction, sur sa garniture extérieure. La première bouteille est la seule qui reçoive de la machine le fluide positif de son armature intérieure, et la dernière est la seule aussi qui laisse perdre dans le sol le fluide positif développé par induction sur son armure extérieure. Chacune des autres bouteilles emprunte, par son armure intérieure, de l'électricité positive à l'armure extérieure de celle qui la précède, et à son tour fournit, par sa garniture extérieure, du fluide positif à la garniture intérieure de celle qui la suit. Dans toutes ces bouteilles, la disposition des fluides est la même, mais évidemment l'intensité de la charge va décroissant de la première à la dernière.

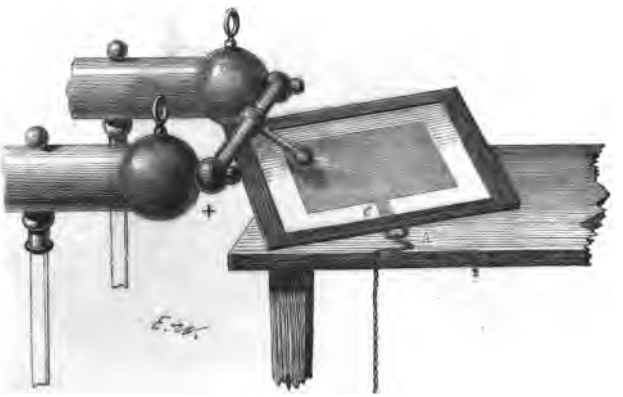


Fig. 72.

Carreau fulminant. — Le carreau fulminant est un véritable condensateur. Il se compose (Fig. 72) d'un

carreau de verre ordinaire fixé sur un cadre de bois. Sur la face supérieure du carreau, on colle une lame rectangulaire d'étain qui ne touche pas le cadre. Sur la face inférieure, on colle une lame semblable d'étain qui, par un prolongement métallique *c*, est en communication avec l'anneau métallique A du cadre de bois. Pour charger l'appareil, il suffit de faire communiquer la lame d'étain de la face supérieure avec le conducteur de la machine, et l'anneau A avec le sol.

Batterie électrique.—La batterie électrique se compose d'une réunion de *jarres*, ou grosses *bouteilles de Leyde*, qui communiquent toutes entre elles par leurs armures extérieures et par leurs armures intérieures. La caisse de bois C (Fig. 73) est tapissée en dedans d'une feuille d'étain

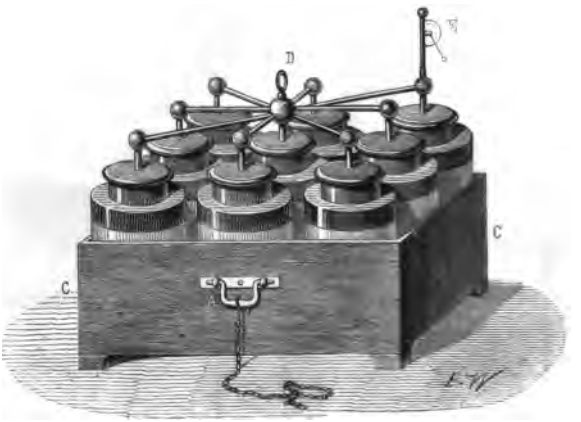


Fig. 73.

en contact avec la poignée métallique extérieure A. Dans ette caisse, on dispose un nombre déterminé de *jarres;*

la feuille d'étain établit une communication métallique entre toutes leurs armures extérieures. De plus, les boutons de toutes les jarres sont réunis par une série de tringles métalliques horizontales. L'appareil représente donc une vaste bouteille de Leyde dont les armures seraient égales, en surface, à la somme des surfaces des garnitures métalliques intérieures et extérieures de toutes les jarres. Pour charger la batterie, on fait communiquer la poignée A avec le sol, et l'anneau D avec la machine électrique. Sur le bouton de l'une des *jarres*, on a soin de placer un électroscope à cadran E, afin de pouvoir se rendre compte des progrès de l'accumulation de l'électricité.

Excitateur universel. — Pour faire passer la décharge d'une batterie à travers un corps quelconque, on se sert

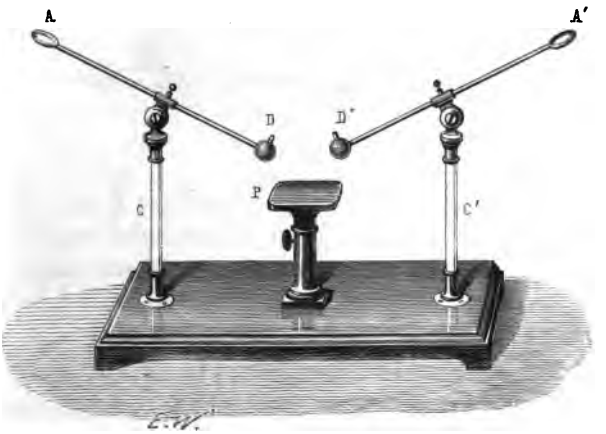


Fig. 74.

de l'*excitateur universel* (Fig. 74). C, C' sont deux colonnes isolantes. Chacune d'elles est surmontée d'un genou métal-

lique garni d'une douille dans laquelle peut glisser une tige métallique aussi. L'anneau A′ est mis en communication avec l'armure extérieure, et l'anneau A avec l'armure intérieure de la batterie. La décharge s'opère alors à travers le corps placé sur le support P entre les extrémités sphériques D et D′ des deux tiges métalliques.

Bouteille électrométrique. — L'armure extérieure de cette bouteille (Fig. 75) communique, par une bande

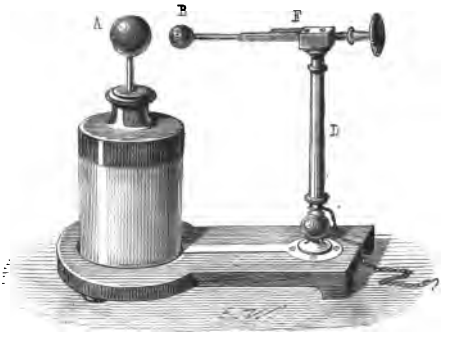


Fig. 75.

métallique C, avec une colonne métallique D qui communique elle-même avec le sol. A l'extrémité supérieure de cette colonne se trouve un appareil micrométrique F qui permet d'approcher ou d'éloigner la boule B de la boule A, et de déterminer très exactement la distance de ces deux sphères métalliques. Quand les deux boules sont suffisamment rapprochées, la bouteille se décharge spontanément. On peut, à l'aide de cet appareil, déterminer les rapports d'intensité de deux sources électriques, soit en comparant les distances auxquelles il faut ramener

les deux boules pour que la bouteille *chargée à saturation* donne *spontanément* l'étincelle, soit en comparant les nombres de décharges *spontanées* que fournit, dans un temps donné, un électromètre de ce genre mis successivement en communication avec chacune des deux sources étudiées, et dont les boules A et B sont maintenues à une distance constante.

On peut, et c'est là son application la plus importante, se servir de cet électromètre pour mesurer la charge communiquée à une batterie électrique. En effet les boules A et B étant maintenues à une distance *constante*, faisons communiquer l'armure intérieure de l'électromètre avec l'armure extérieure d'une batterie isolée qui elle-même est en communication, par sa garniture intérieure, avec le conducteur d'une machine. Toute l'électricité positive développée, par induction, sur l'armure extérieure de la batterie passe sur l'armure intérieure de l'électromètre, qui lui-même donne une décharge spontanée toutes les fois qu'il est chargé à saturation. Mais, puisque les boules sont maintenues à une distance *constante*, à chaque décharge spontanée de l'électromètre correspond nécessairement une *même* quantité d'électricité positive accumulée sur son armure intérieure, et par conséquent une *même* quantité d'électricité négative retenue sur l'armure extérieure de la batterie. La quantité d'électricité positive que l'armure intérieure de la batterie doit recevoir du conducteur de la machine, pour que la bouteille électrométrique se décharge spontanément, est donc aussi *constante*.

Si donc nous prenons, pour *unité de charge électrique*,

la quantité d'électricité que l'armure interne de la batterie doit recevoir de la machine pour déterminer une décharge spontanée de la bouteille électrométrique, la charge totale de la batterie, à un moment donné de l'opération, sera égale au nombre des étincelles qui auront spontanément jailli, depuis le commencement de l'expérience, entre les boules A et B de l'électromètre. Nous aurons plus tard occasion de signaler des cas nombreux dans lesquels ce procédé a été employé pour mesurer les charges de batteries électriques.

Électroscope condensateur. — Cet appareil est d'une très grande sensibilité, et permet de déterminer la nature de l'électricité fournie par des sources très faibles. A l'ex-

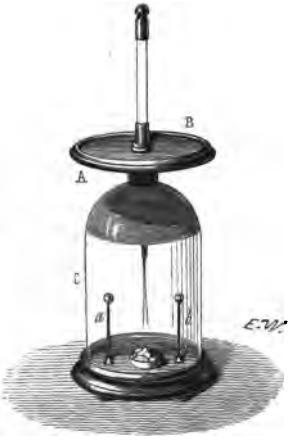


Fig. 76.

trémité de la tige d'un électroscope à feuilles d'or, on visse un plateau métallique circulaire A (Fig. 76), dont la face

supérieure est enduite d'une couche très mince d'un vernis isolant. Sur ce plateau on en applique un second B muni d'un manche isolant, et dont la face inférieure est enduite aussi d'une couche de vernis isolant. Ces deux plateaux représentent les deux armures d'un condensateur. Une source d'électricité très faible étant mise en communication avec le plateau B, on touche le plateau A avec le doigt; le fluide de la source est accumulé et condensé sur B, tandis que le plateau A se charge, par induction, de fluide de nom contraire. Au moment où l'on enlève le plateau B, l'électricité de A se répand sur les feuilles d'or et les fait diverger. A cause de la faible épaisseur du vernis isolant, la *force condensante* de cet appareil est très grande, et la tension de chacun des plateaux, après leur séparation, est beaucoup plus considérable que celle de la source électrique employée. Cet électroscope permet donc de constater la présence et la nature du fluide électrique libre fourni par des sources électriques qui n'ont pas assez de tension pour agir, d'une manière appréciable, sur les électroscopes ordinaires.

Tourniquet électrique. — Lorsqu'on place une pointe métallique sur le conducteur d'une machine électrique en activité, l'électricité s'écoule par la pointe sous forme d'une aigrette lumineuse. En outre, les molécules d'air en contact avec la pointe s'électrisent, sont violemment repoussées et remplacées par de nouvelles molécules gazeuses qui, à leur tour, s'électrisent et sont ensuite lancées dans l'espace comme des projectiles. La pointe métallique devient ainsi le point de départ d'un véritable courant d'air assez intense pour incliner et même éteindre la flamme

d'une bougie placée dans le voisinage (Fig. 77). L'existence de ce courant d'air, connu sous le nom de *vent électrique*, peut aussi être constatée par l'impression qu'il fait sur la main placée en face de la pointe. Comme dans

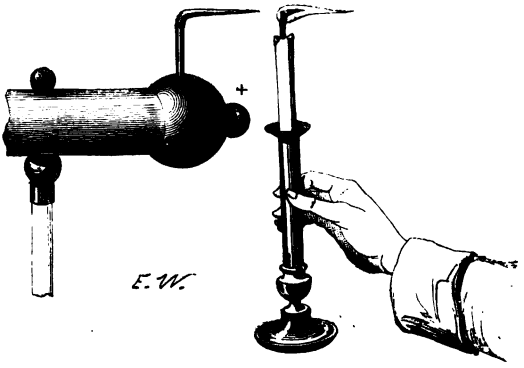


Fig. 77.

tous les phénomènes mécaniques, la réaction est égale à l'action; la pointe métallique doit donc éprouver une pression qui tend à la repousser en sens inverse du mouvement imprimé aux molécules gazeuses électrisées. Ces considérations bien simples suffisent pour expliquer le mouvement que prend le *tourniquet électrique* quand il est en communication avec une machine en activité.

Le *tourniquet électrique* (Fig. 78) se compose de tiges métalliques horizontales, fixées à une chape centrale et terminées par des pointes toutes recourbées dans le même sens. La chape est elle-même appuyée sur une pointe métallique C supportée par un pied isolant, en sorte que l'ensemble des tiges recourbées est très mobile et peut faci-

lement tourner dans un plan horizontal. Lorsque la pointe C est mise en communication avec le conducteur d'une machine électrique en activité, immédiatement le

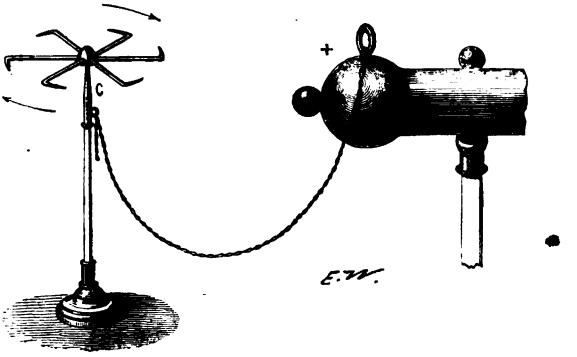


Fig. 78.

petit appareil entre en mouvement et tourne, autour de son centre de suspension, dans la direction des flèches. Dans l'obscurité, toutes ces pointes sont lumineuses, et il suffit d'approcher la main pour constater que, de chacune d'elles, s'échappe un courant d'air dont la réaction est la véritable cause du mouvement de recul exécuté par le système.

Si pendant qu'il tourne, on recouvre le tourniquet électrique avec une cloche de verre, le mouvement se ralentit peu à peu et s'arrête complétement. Ce résultat pouvait être facilement prévu. En effet, la masse d'air contenue dans la cloche étant limitée et isolée, ses molécules ne tardent pas à être toutes chargées de la même électricité que les tiges métalliques ; dès lors, il ne peut

plus s'établir de courant d'air à l'extrémité des pointes, le frottement détruit la vitesse acquise, et l'appareil ne tarde pas à devenir immobile.

Mais, si la machine continuant à marcher, on applique, sur la paroi externe de la cloche, un corps conducteur quelconque en communication avec le sol, la rotation recommence et continue pendant un temps d'autant plus considérable que la surface du conducteur appliqué sur la cloche est elle-même plus étendue, et puis elle s'arrête spontanément. Dans ce cas évidemment, le conducteur placé sur la cloche s'électrise par induction, et joue le rôle de l'armure extérieure de la bouteille de Leyde. Sous son influence et dans une étendue égale à sa propre surface, la paroi interne de la cloche s'électrise aux dépens de l'air qu'elle renferme. Dès lors, les molécules de la masse confinée n'étant pas uniformément électrisées, le courant d'air à l'extrémité de chaque pointe et le mouvement de rotation qui en est la conséquence se rétablissent, et continuent jusqu'à ce que la partie de la cloche doublée extérieurement par la surface conductrice soit chargée à saturation. A ce moment, le gaz confiné étant de nouveau uniformément électrisé dans toute son étendue, les courants d'air cessent, et le tourniquet s'arrête spontanément.

Après ce que nous venons de dire, l'explication des expériences suivantes se présente d'elle-même.

Le pivot métallique du tourniquet passe à travers le fond d'un vase de verre enduit d'une couche de vernis à la gomme laque, et dont les bords libres s'élèvent au-dessus des tiges horizontales mobiles. On a beau électriser l'ap-

pareil, aucun mouvement n'est produit; mais il suffit de présenter une pointe métallique en communication avec le sol à l'ouverture supérieure du vase, et de donner ainsi écoulement à l'électricité des couches gazeuses, pour que la rotation s'établisse immédiatement. Si l'on remplit le vase avec un liquide mauvais conducteur, tel que l'huile d'olive, l'essence de térébenthine, le sulfure de carbone, etc., le tourniquet, plongé dans le liquide, reste immobile tant qu'on ne présente pas la pointe métallique à l'ouverture supérieure du vase; mais la rotation commence quand on détruit l'uniforme répartition de l'électricité en présentant, à la surface libre du liquide *isolant*, une pointe métallique en communication avec le sol.

Quand on remplit le vase isolant avec de l'eau ou tout autre liquide *conducteur*, le moulinet reste à l'état de repos, même quand on présente une pointe métallique à l'orifice supérieur du vase. Dans ce cas, tous les points de l'appareil mobile cédant l'électricité au liquide environnant, il n'y a pas de raison pour que le tourniquet, également sollicité dans toutes les directions, tourne dans un sens plutôt que dans un autre.

CHAPITRE III.

DE LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE.

L'électricité, accumulée à l'état libre sur les conducteurs, agit par induction sur les conducteurs voisins, et

retient à leur surface une charge de fluide de nom contraire. Quand les tensions opposées ont acquis assez d'intensité pour surmonter la résistance du milieu interposé, les deux électricités traversent l'espace qui sépare le corps inducteur du corps induit et se neutralisent; il y a décharge électrique. Les effets produits par le passage de l'électricité et le mode de propagation de l'agent varient suivant la nature du milieu placé entre le corps inducteur et le corps induit; de là vient la nécessité de distinguer trois espèces de décharge électrique.

Dans un premier cas, l'électricité traverse des corps bons conducteurs comme les métaux ; la décharge, dans cette circonstance, détermine une élévation de température, mais elle ne produit ni actions chimiques, ni étincelles, ni d'autres déplacements des molécules que ceux qui doivent être rapportés à l'échauffement du métal : c'est la *décharge par conduction*, ou *décharge conductive* de M. Faraday.

Dans un deuxième cas, la décharge s'opère à travers un corps isolant solide, liquide ou gazeux, ou seulement à travers un conducteur imparfait, comme l'eau par exemple. L'électricité détermine alors sur son passage un déplacement de particules, des phénomènes de bruit et de lumière, la rupture du corps traversé et quelquefois des réactions chimiques : c'est la *décharge par disruption*, ou *décharge disruptive* de M. Faraday.

Enfin, l'électricité statique peut traverser les liquides composés par voie de conductibilité et sans étincelle; dans ce cas, elle agit surtout comme agent de décomposition chimique. Nous ne dirons rien ici de ce mode de propagation de l'électricité statique décrit par M. Faraday sous

le nom de *décharge électrolytique;* nous en parlerons, avec tous les détails convenables, dans le chapitre de la troisième section consacré aux effets chimiques des courants électriques.

ARTICLE PREMIER.

DÉCHARGE CONDUCTIVE.

Entre les branches P, P′ (Fig. 79) d'un excitateur universel, tendons un mince fil de platine F ; à la branche P′

Fig. 79.

fixons une chaîne en communication avec la garniture extérieure d'une batterie ou d'une forte bouteille de Leyde, et rapprochons le bouton de la garniture intérieure de l'anneau de l'autre branche P. La couche d'air placée entre la boule et l'anneau est traversée par une étincelle, et, par voie de conduction, l'électricité traverse la chaîne, les deux branches de l'excitateur et le fil de platine F. Il y a donc une décharge *disruptive* entre l'anneau de la branche P et la boule de la garniture intérieure, et, en même temps, une décharge *conductive* à travers les pièces métalliques de l'appareil. Au moment du passage de l'électricité, la température de fil F s'élève, et, si la charge est suffisante, ce fil devient incandescent, peut être fondu et même volatilisé.

Entre les deux branches de l'excitateur universel, on tend un *fil de soie doré*, et contre le fil on applique un morceau de carton blanc (Fig. 80). Au moment où l'appa-

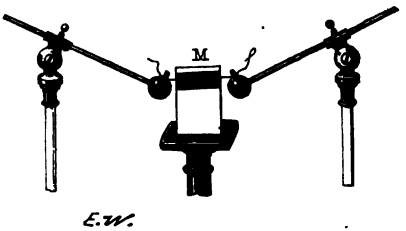


Fig. 80.

reil est mis en communication avec les armures d'une forte bouteille de Leyde, l'électricité traverse le fil doré dans toute son étendue. La *décharge conductive* respecte le fil de soie qui reste intact, mais elle échauffe l'enve-

loppe métallique, *volatilise* l'or et le projette, sous forme de poudre noirâtre très fine, contre la feuille blanche de carton.

Cette propriété, dont jouit la décharge conductive, de réduire en poudre impalpable, de volatiliser les feuilles minces, a été mise à profit pour faire des empreintes de découpures. Sur la partie médiane d'une feuille de papier épais B, garnie de deux lames d'étain F, F′, on fait une découpure (Fig. 81). On recouvre la face antérieure de la découpure d'une feuille d'or qui s'étend, de chaque côté,

Fig. 81.

Fig. 82.

jusqu'aux lames d'étain, puis on rabat les parties latérales A, C de la feuille de papier sur la feuille d'or ; enfin, on double la face postérieure de la découpure avec un ruban de soie blanche. Pour assurer les contacts, on place le tout sous la presse P (Fig. 82), et l'on dépose la presse sur le support de l'excitateur universel dont les branches reposent, par leurs boules terminales, sur les lames d'étain F, F′. Si l'on fait passer, à travers le système, la décharge d'une batterie électrique, la feuille d'or est vola-

tilisée et réduite en une poudre noirâtre qui, projetée à travers la découpure, en imprime les contours sur le ruban de soie blanche. Quand la charge de la batterie est très forte, la poudre d'or passe, en partie, à travers le tissu du ruban de soie et se fixe sur la feuille de papier blanc placée au-dessous.

Il nous suffit, pour le moment, d'avoir montré que les corps traversés par la décharge conductive éprouvent une élévation de température; dans la troisième section, à propos de propriétés physiques des courants, nous reviendrons sur ces phénomènes. Nous pourrons ainsi étudier comparativement les lois des effets calorifiques déterminés, dans les conducteurs métalliques, par les courants d'électricité dynamique et par le passage de l'électricité statique. Nous devons insister ici, d'une manière spéciale, sur les recherches relatives à la vitesse de propagation des décharges électriques dans les fils métalliques. Les résultats de ces observations sont de nature à nous fournir des notions très précises sur le mode de transmission de l'électricité dans les corps traversés par la décharge conductive.

Vitesse de propagation de la décharge électrique. — Dès que la bouteille de Leyde fut connue, les physiciens du siècle dernier essayèrent, sans succès, de déterminer la vitesse de propagation de l'électricité; de toutes ces tentatives, la plus remarquable est celle que fit Watson en 1748. Il disposa, sur des supports isolants et très bien desséchés, deux fils de fer dont chacun avait 1872 mètres de longueur, et dont les quatre bouts étaient ramenés dans une même chambre. Ces deux fils servaient d'arc de communication entre les deux armures d'une bouteille de

Leyde. L'un de ces fils était fixé par un bout à l'armure extérieure de la bouteille, l'autre fil avait un de ses bouts placé en face et très près de la tige de garniture intérieure; Watson prenait dans ses mains les deux autres bouts libres. Au moment de la décharge, une étincelle se montrait du côté de l'armure intérieure, et Watson éprouvait une commotion. Quoique les deux électricités eussent chacune 1872 mètres à parcourir pour se propager des deux armures de la bouteille au corps de l'observateur, il ne put jamais saisir le moindre intervalle de temps entre le moment de l'apparition de l'étincelle et celui où il ressentait la commotion. Tous ces essais infructueux portèrent les physiciens à penser que la vitesse de propagation de l'électricité était assez grande pour échapper à tout moyen d'appréciation.

En 1834, M. Wheatstone (1) reprit cette expérience, mais, comme moyen d'apprécier la vitesse de propagation de l'électricité, il employa le miroir tournant dont M. Foucault a fait, dans ces dernières années, une si belle application à une des plus importantes questions d'optique. Nous pensons devoir reproduire ici les principes sur lesquels repose le procédé de l'habile physicien anglais.

Soit (Fig. 83) *m n*, un miroir plan métallique, mobile autour d'un axe horizontal projeté en *c*. En *a* produisons une étincelle électrique. Si le miroir reste immobile, l'œil placé en *o* verra par réflexion, en *a'*, l'image du point lumineux *a*. Imprimons au miroir un mouvement de rotation sur son axe *c*; si la durée de l'étincelle est trop courte pour

(1) *Archives de l'électricité*, 1842, t. II, p. 37.

donner au miroir le temps de se déplacer sensiblement pendant que la décharge a lieu, l'observateur apercevra, en a', un simple point lumineux absolument comme si le miroir était au repos. Mais, si l'étincelle a une durée

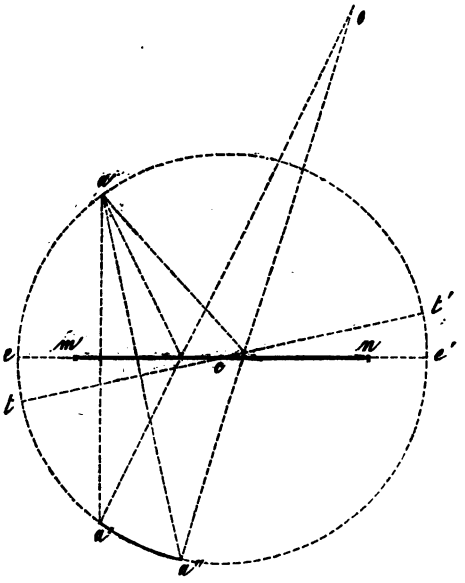


Fig. 85.

appréciable ; si, pendant la décharge, le miroir a le temps de passer de la position ee' à la position tt', l'image du point a occupera successivement tous les points de l'arc $a'a''$, et, en vertu de la persistance des impressions de la rétine, l'observateur, placé en o, ne verra plus un point, mais un arc lumineux $a'a''$. D'ailleurs les angles $a'aa''$, ect sont égaux comme ayant les côtés perpendicu-

laires l'un à l'autre; mais l'angle *ect*, comme angle au centre, a pour mesure l'arc *et*, tandis que l'angle $a'aa''$, ayant son sommet sur la circonférence, est mesuré par la moitié de l'arc $a'a''$. Donc l'arc $a'a''$, décrit par l'image du point *a*, est double de l'arc *et* qui mesure le déplacement angulaire du miroir tournant.

A l'aide d'un miroir tournant dont la vitesse de rotation était de 800 tours par seconde, M. Wheatstone trouva que l'image d'une étincelle électrique *a*, parallèle à l'axe de rotation, fournie par une bouteille de Leyde, et de $2^{mm},54$ de longueur, était une bande lumineuse de même longueur, mais élargie transversalement de manière à occuper un arc $a'a''$ de 24°. Par conséquent, la durée de la décharge électrique *disruptive* qui traversait la couche d'air était telle que le miroir avait le temps d'éprouver une déviation angulaire mesurée par un arc *et* de 12°. Mais, avec sa vitesse de 800 tours par seconde, ce miroir, en une seconde de temps, aurait parcouru 360×800 degrés. Le temps employé par le miroir à décrire l'arc *et* de 12°, était donc une fraction de seconde égale à $\frac{12}{360 \times 800}$ ou $\frac{1}{24000}$. Il résulte de cette expérience que l'étincelle de décharge avait une durée de $\frac{1}{24000}$ de seconde de temps.

Sur une planche de bois circulaire M (Fig. 84), M. Wheatstone plaçait *six* boules de cuivre disposées en trois groupes. La boule 1 et la boule 2 étaient réunies l'une à l'autre par un fil de cuivre de 400 mètres de longueur et de $1^{mm},7$ de diamètre; les boules 3 et 4 étaient réunies par

un fil de cuivre de même diamètre et de même longueur ; les boules 5 et 6 communiquaient, par des fils de cuivre courts, avec les armures intérieure et extérieure d'une

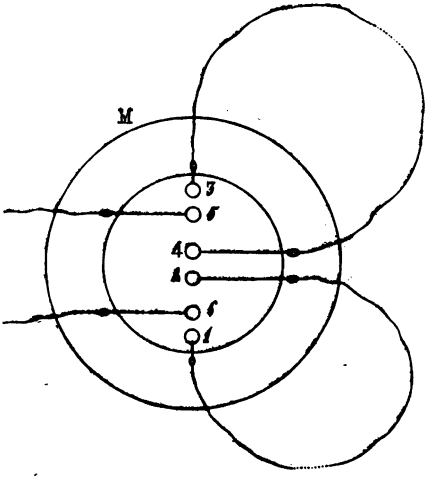


Fig. 84.

bouteille de Leyde. D'ailleurs, les deux boules de chacun des trois groupes étaient maintenues à $2^{mm},54$ de distance, et les centres des six boules se projetaient sur un même diamètre de la planche M. Au moment de la décharge de la bouteille, il y avait nécessairement trois étincelles placées en ligne droite. Cet appareil à étincelles était disposé de telle manière que la ligne des centres des six boules était parallèle à l'axe de rotation du miroir qui faisait 800 tours par seconde. Les trois images vues par réflexion représentaient trois arcs lumineux d'un même nombre de degrés et disposés, les uns par rapport aux

autres, comme dans la figure 85, ou comme dans la figure 86, suivant que le miroir tournait dans un sens ou dans un autre.

La disposition des images indique que, dans cette expérience, les deux étincelles extrêmes étaient simultanées, et que l'étincelle du milieu était, *seule*, en retard sur les

Fig. 85.

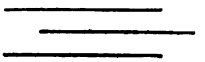
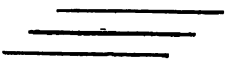


Fig. 87.



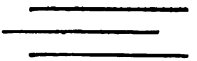


Fig. 86.

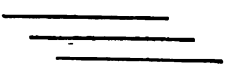


Fig. 88.

deux autres. Cela prouve que les deux fluides, fournis par les deux armures, étaient propagés simultanément et avec la même vitesse à travers les fils de cuivre, l'un de la boule 1 à la boule 2, et l'autre de la boule 3 à la boule 4. Si, en effet, un des deux fluides avait traversé *seul* tous les fils pour aller d'une armure à l'autre, les images auraient affecté une des deux dispositions représentées dans les figures 87 et 88; ce cas ne s'est jamais présenté.

Il résulte des observations de M. Vheatstone que le retard de l'étincelle du milieu par rapport aux deux autres était de 1/2 degré, ce qui suppose que les électricités négative et positive avaient parcouru chacune un fil de cuivre de 400 mètres de longueur dans le temps que le miroir avait mis à se déplacer de 1/4 de degré, c'est-à-dire

dans $\frac{1}{4 \times 360 \times 800}$ de seconde de temps. Ainsi, d'après cette expérience, la décharge conductive d'une bouteille de Leyde parcourt un fil de cuivre de $1^{mm},17$ de diamètre avec une vitesse de propagation de 460 800 kilomètres par seconde.

M. Wheatstone, à la fin de son mémoire, indique que, probablement, la vitesse de transmission de la décharge conductive serait modifiée par la nature des fils conducteurs, et aussi par la tension de la source électrique. Conformément aux prévisions de l'habile physicien anglais, des expériences ultérieures sur les courants voltaïques ont prouvé que la *nature* du conducteur exerce une grande influence sur la vitesse de propagation de l'électricité, mais ces recherches ont démontré que cette vitesse est indépendante de la *tension* de la source.

Mode de propagation de l'électricité dans la décharge conductive. — Cette expérience de M. Wheatstone prouve que le cuivre oppose, au passage de l'électricité, une résistance très faible sans doute, mais cependant appréciable. Le retard de l'étincelle médiane serait plus considérable si, dans l'appareil représenté figure 84, le fil de cuivre était remplacé par un fil de fer et surtout par un fil de platine de même longueur et de même diamètre. La résistance du mercure serait plus grande que celle du platine, et celle de l'eau beaucoup plus forte que celle du mercure. A la suite de ces faits, rappelons les belles expériences de MM. Faraday et Matteucci (pages 143 et suiv.), dans lesquelles nous avons vu l'électricité pénétrer dans les lames de spermaceti, de mica, de gomme laque, de verre

et de soufre disposées en condensateurs, et se propager lentement des faces immédiatement en contact avec les armures métalliques à des couches d'autant plus profondément situées, que l'appareil était plus fortement et restait plus longtemps chargé; nous serons ainsi conduits à repousser également toute idée de *conductibilité parfaite* et d'*isolement absolu* comme contraire aux résultats de l'observation directe. Toute substance oppose une certaine résistance à la propagation de l'électricité de couche en couche par voie de conduction; depuis le meilleur conducteur, l'argent, jusqu'au meilleur isolant, le soufre, cette résistance augmente graduellement. L'argent et le soufre occupent les deux points extrêmes d'une série dans laquelle tous les corps viennent se placer, à la suite les uns des autres, par ordre de résistance opposée à ce mode de transmission de l'électricité.

Sous l'influence d'un corps électrisé, le verre, la gomme laque, le soufre, tous les gaz se polarisent moléculairement. Quand cesse l'action des corps électrisés, cet état polaire disparaît spontanément par voie de recomposition des fluides séparés à la surface de chaque molécule; mais, tant que le corps électrisé reste en présence, l'état polaire persiste et donne au corps isolant la faculté de transmettre l'action inductrice d'une charge électrique aux conducteurs environnants. Cependant, quand cet état de polarisation persiste, une partie de l'électricité libre du corps inducteur passe, lentement et progressivement, d'abord à la couche la plus superficielle du diélectrique, puis de celle-ci aux suivantes, et détruit ainsi l'état polaire des couches qu'elle envahit pour les électriser

uniformément et d'une manière permanente. Cette pénétration du fluide dans le diélectrique entraîne une déperdition d'électricité qui affaiblit graduellement la charge primitive du corps inducteur; mais cette transmission est tellement lente, que les corps *isolants proprement dits* ne peuvent jamais donner passage à une véritable *décharge conductive*. Quand la tension inductrice est assez forte pour que l'électricité traverse rapidement les corps isolants, l'agent ne se propage plus successivement de couche en couche; *la décharge est disruptive* et s'opère suivant un mode particulier que nous étudierons bientôt.

Entre les *métaux* et les *isolants* il n'y a pas de distinction *absolue* à établir; toute la différence consiste dans le plus ou moins de résistance que ces corps opposent à la transmission de l'électricité. Le mode de propagation doit nécessairement être le même dans les uns et dans les autres. Les métaux aussi se polarisent moléculairement quand ils sont en présence d'un corps électrisé; seulement une tension polaire très faible suffit pour que les molécules contiguës se déchargent les unes sur les autres. Dès lors, l'électricité extérieure pénètre très facilement les métaux et les traverse avec une extrême rapidité. Mais, que les corps soient bons conducteurs ou isolants, la transmission de l'électricité à travers leur masse, quand elle se fait par voie de conductibilité, s'opère toujours suivant le même mode; c'est une propagation de molécule à molécule, une succession de décharges échangées, plus ou moins rapidement et sans déplacement apparent de particules matérielles, entre molécules contiguës constituées momentanément en état

de tensions opposées. La déperdition, excessivement lente, de l'électricité d'un conducteur en contact avec une masse de soufre ou de gomme laque s'opère suivant le même mode que la décharge *conductive*, si rapide, qui traverse une série de pièces métalliques.

Soit (Fig. 89) M un fil métallique *très long* employé à établir la communication entre les deux armures d'une

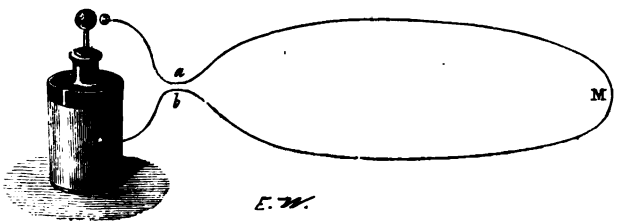


Fig. 89.

bouteille de Leyde. A une faible distance de ses extrémités, courbons le fil de manière que les portions *a* et *b* ne soient séparées que par une couche d'air de 5 à 6 millimètres d'épaisseur. Au moment de la décharge, si toutefois la bouteille est assez puissante, la majeure partie de l'électricité, au lieu de parcourir le circuit métallique *a*M*b*, passe directement de *a* en *b*, à travers l'air, sous forme d'étincelle. De cette expérience fort anciennement connue, M. Faraday (1) a déduit des conséquences d'une haute importance pour le sujet qui nous occupe. Evidemment, dans ce cas, l'air placé entre *a* et *b* a opposé, au passage de l'électricité, moins de résistance que le fil *a*M*b*; ce

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 422.

fil métallique, en raison de sa longueur, s'est donc conduit comme un *isolant*. En second lieu, l'étincelle démontre l'existence de tensions opposées dans les portions *a* et *b* du fil métallique; ces tensions ont réagi par induction l'un sur l'autre, d'une part à travers l'air, d'autre part à travers le circuit métallique *a*M*b*; le métal et le gaz ont, l'un et l'autre, joué le rôle d'un diélectrique par rapport à ces tensions; et c'est parce que du côté de l'air l'induction a été plus forte et la résistance moindre, que la majeure partie de l'électricité est passée directement de *a* en *b* sous forme d'étincelle ou par décharge *disruptive*. L'existence et la manifestation de ces tensions électriques dans les couches d'un circuit métallique successivement envahi par la décharge *conductive* prouve que, dans les corps *conducteurs* comme dans les *isolants*, la polarisation moléculaire, ou l'induction, précède toujours la transmission de l'électricité à travers leur masse.

A ce point de vue, pris dans les découvertes de M. Faraday, l'induction, ou la polarisation moléculaire, est le fait général; la conductibilité et le pouvoir isolant ne sont que la traduction de la résistance, plus ou moins énergique, que les divers corps opposent à la destruction de cet état polaire par voie de décharge entre molécules contiguës. Le soufre, la gomme laque, le verre, et tous les corps chez lesquels cette résistance est très forte, ne livrent que très difficilement et très lentement passage à l'électricité; ce sont des *isolants*. Dans les métaux, au contraire, cette résistance est très faible, la décharge s'opère très facilement entre molécules contiguës; ces corps sont de *bons conducteurs*. A travers les premiers, il ne peut s'opérer, par voie

de conductibilité, qu'une simple *déperdition* très lente d'électricité; les seconds livrent passage à de véritables décharges *conductives*. Entre ces deux groupes viennent se placer tous corps de la nature; par leur résistance au passage de l'électricité, les uns se rapprochent du verre et du soufre, les autres prennent rang à côté des métaux. Mais tous obéissent à une loi commune; sous l'influence d'une charge électrique extérieure, leurs molécules commencent par se polariser, puis, quand l'électricité les pénètre, le fluide se propage, dans leur intérieur, de molécule à molécule, très lentement chez les uns, avec une vitesse excessive chez les autres.

ARTICLE II.

DÉCHARGE DISRUPTIVE.

Lorsque deux corps chargés de fluides de noms contraires sont en présence et séparés par un milieu isolant, solide, liquide ou gazeux, la combinaison des deux électricités ne peut plus se faire par voie de conduction. Cependant, quand les tensions opposées ont atteint une certaine intensité variable avec la nature de l'isolant interposé et la distance des deux corps électrisés, la résistance au passage des fluides est vaincue, le milieu diélectrique est traversé par une *décharge disruptive*, accompagnée d'un violent déplacement des molécules du corps isolant, d'un bruit particulier et de phénomènes lumineux. Dans la troisième section, nous étudierons d'une manière spéciale les phénomènes lumineux de la

décharge disruptive; nous nous contenterons de dire ici que, suivant les circonstances ambiantes, ils ont des formes et des apparences très variées : ce sont tantôt de *simples lueurs*, des phosphorescences perceptibles seulement dans l'obscurité la plus complète, tantôt de brillantes *aigrettes* diversement ramifiées, tantôt enfin des traits de feu d'une clarté éblouissante, resserrés, étroits, à contours nettement limités, de véritables *étincelles* en *zigzag* en tout semblables aux éclairs fulgurants. Dans le but de nous éclairer sur le mode de propagation de l'électricité pendant la *décharge disruptive*, nous devons surtout étudier les effets que cette décharge détermine, soit dans le milieu qu'elle traverse, soit à la surface des conducteurs entre lesquels elle éclate, et les conditions expérimentales de sa production.

Effets de la décharge disruptive.—A (Fig. 90) représente un petit mortier d'ivoire, et B une petite boule de même substance. Quand les tiges métalliques E, D sont mises en communication avec les armures d'une forte bouteille de Leyde, la décharge disruptive, en passant de l'une à l'autre à travers la cavité C, produit dans les couches d'air qu'elle traverse une expansion suffisante pour lancer au loin la petite balle B.

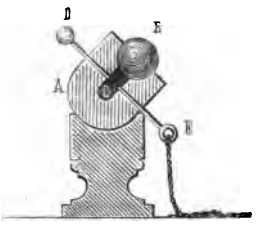


Fig. 90.

Kinnersley a imaginé (Fig. 91) un appareil destiné à mesurer le refoulement occasionné par la décharge disruptive dans les masses gazeuses qu'elle traverse. Un fort tube de verre V, fermé à ses deux bouts par des montures

métalliques, communique avec un tube latéral K. On commence par verser de l'eau colorée au fond du tube V, puis on fait communiquer les deux armures d'une bouteille de Leyde avec les deux tiges métalliques placées dans la direction de son axe. Au moment où l'étincelle passe de *a* en *b*, le liquide s'élève brusquement dans le tube K, et puis reprend, aussitôt et à très peu près, son niveau primitif. Ce déplacement du liquide, dans la branche latérale K, donne la mesure du refoulement éprouvé par le gaz contenu dans l'appareil.

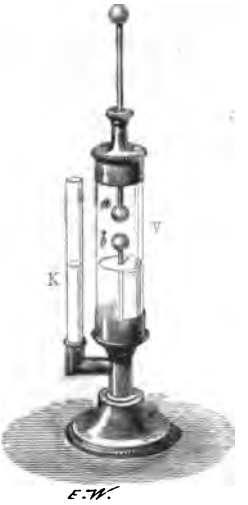


Fig. 91.

Un tube de verre V (Fig. 92) est rempli d'eau et très fortement bouché. Les bouchons sont traversés par deux tiges métalliques dont l'une communique avec le sol, tandis que l'autre est rapprochée du conducteur D de la machine. Deux étincelles éclatent à la fois, l'une entre *c* et le conducteur D, l'autre entre les deux boules métalliques *a*, *b*; au moment du passage de la décharge disruptive de *b* en *a*,

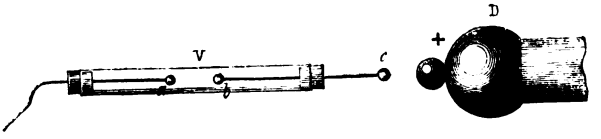


Fig. 92.

le liquide est fortement ébranlé, et le refoulement des molécules est assez considérable pour casser le tube de verre.

Entre les deux pointes métalliques A, D (Fig. 93), on place une carte; le pied métallique de la pointe inférieure est mis en communication, au moyen de la chaîne E, avec l'armure extérieure de la bouteille de Leyde, tandis que le bouton de la garniture intérieure est rapproché de la sphère métallique B; d'ailleurs, les deux pointes sont isolées l'une de l'autre par un cylindre de verre C. Ce petit appareil est connu sous le nom de *perce-carte*. Au moment de la décharge, l'électricité traverse la carte et la perce d'un petit trou plus rapproché de la pointe négative que de la positive. Sur les deux faces de la carte, le trou est entouré d'un bourrelet et de bavures dirigées en dehors.

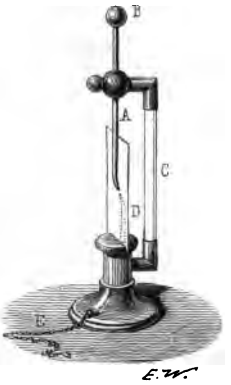


Fig. 93.

On place (Fig. 94) une lame de verre C horizontalement entre deux pointes métalliques, en ayant soin de verser une goutte d'huile autour de la pointe supérieure. On fait communiquer la garniture métallique B, sur laquelle repose la pointe inférieure, avec l'armure extérieure d'une bouteille de Leyde, et l'on rapproche le bouton de la garniture intérieure de la sphère métallique A. La décharge disruptive s'opère à travers la plaque de verre C, et la perce d'un trou entre les deux pointes opposées. Cette expé-

rience du *perce-verre* est la reproduction de la décharge spontanée, avec *cassure* de la lame de verre, d'une bouteille de Leyde mise en communication avec une machine trop puissante. Dans ce dernier cas, les électricités accumu-

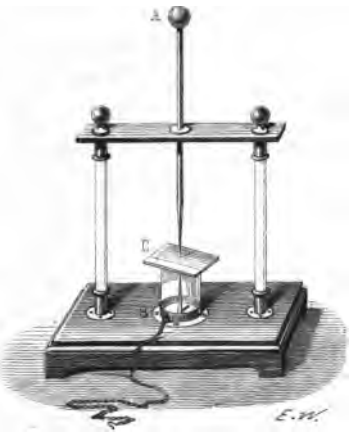


Fig. 94.

lées sur les deux armures acquièrent une tension suffisante pour surmonter la résistance de la lame de verre interposée; les molécules de verre sont violemment écartées, la lame est brisée et traversée par une décharge disruptive spontanée.

La décharge disruptive détermine, dans les milieux qu'elle traverse, des effets chimiques très variés. Des combinaisons très stables peuvent être détruites par une série d'étincelles successives. Ainsi l'eau, l'acide sulfurique, l'ammoniaque, sont décomposés, et leurs éléments mis en liberté; l'acide carbonique est transformé en un mélange d'oxyde de carbone et d'oxygène; le gaz nitreux

fournit de l'acide azotique et de l'azote libre. La décharge disruptive, dans certaines circonstances, favorise la combinaison des corps. Sous son influence, l'oxygène se combine avec l'azote pour faire de l'acide azotique. Quand l'étincelle traverse un mélange d'oxygène et d'hydrogène, les deux gaz se combinent et forment de l'eau; c'est sur cette propriété que sont fondés l'eudiomètre et le pistolet de Volta. Il n'est pas de notre sujet de parler de l'emploi de l'eudiomètre, qui rend, tous les jours, de si grands services aux chimistes dans les analyses des mélanges gazeux; nous ne voulons pas non plus nous appesantir sur les propriétés chimiques des décharges électriques, leur étude sera mieux placée dans le chapitre de la troisième section consacré à l'exposition des réactions électro-chimiques; nous nous contenterons, pour le moment, de décrire sommairement le pistolet de Volta.

Le pistolet de Volta (Fig. 95) est un petit vase métallique A, muni d'une tubulure qu'on ferme au moyen d'un bouchon de liége B. A travers la paroi de ce vase passe une tige métallique, isolée au moyen d'un tube de verre et terminée par deux boules D, E. Quand le vase est rempli d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène et bien bouché, on le met en communication avec le sol, et l'on présente la boule extérieure D au conducteur d'une machine. Au moment de la décharge, une étincelle passe, à travers le gaz intérieur, de la boule E à la paroi correspondante, et l'oxygène se combine avec l'hydrogène. L'expansion de la vapeur d'eau produite est suffisante pour projeter le bouchon B avec force, et déterminer une explosion très bruyante.

La décharge disruptive n'agit pas seulement sur le milieu isolant qu'elle traverse ; elle modifie profondément la surface des conducteurs d'où s'échappe l'électricité ;

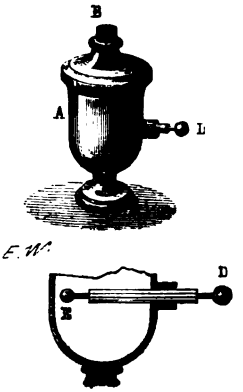


Fig. 96.

des particules pondérables sont violemment *arrachées*, réduites en poudre très fine et entraînées dans le trajet de l'étincelle. Ces phénomènes de transport, très anciennement connus, ont été successivement étudiés par Muschenbroeck, Priestley, Brugnatelli, Davy, etc. M. Fusinieri (1) a publié, dans ces derniers temps, de très intéressantes recherches sur ce sujet. Sans entrer dans le détail de ses expériences, nous devons en faire connaître les principaux résultats.

Toutes les fois qu'une forte étincelle électrique est échangée entre deux sphères métalliques de nature différente, une portion de la surface de la sphère positive est

(1) *Archives de l'électricité*, 1843, t. III, p. 397.

arrachée, réduite en poudre très ténue, et projetée contre la face correspondante de la sphère négative dans l'intérieur de laquelle elle pénètre à une profondeur plus ou moins considérable. En même temps, une portion de la surface de la sphère négative, pareillement *arrachée* et réduite en poussière, se retrouve sur la face correspondante de la sphère positive et à une certaine profondeur. Ces poussières métalliques, qui cheminent ainsi en sens inverse suivant le trajet de l'étincelle, s'échauffent assez pour fondre et se combiner avec l'oxygène de l'air ambiant.

A propos de la lumière électrique, nous reviendrons sur ces observations et sur des effets de même genre produits par le courant de la pile; nous discuterons alors le rôle que ces poussières métalliques transportées jouent dans les phénomènes lumineux de l'arc voltaïque et des décharges disruptives.

Phénomènes électriques dans le vide.— Dans un travail très intéressant sur la propagation de l'électricité dans les corps isolants, M. Matteucci (1) a étudié avec beaucoup de soin l'influence de la raréfaction du milieu gazeux sur les phénomènes électriques.

Sous une cloche remplie de gaz bien sec, on place un cylindre métallique creux en communication avec le sol, et, dans l'axe de ce cylindre, une sphère métallique portée sur une tige isolante. On communique à la sphère *une charge électrique constante*, on raréfie le gaz avec une bonne machine pneumatique, et on laisse rentrer de l'air

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1850, t. XXVIII, p. 415.

bien sec dans la cloche; on porte alors rapidement la sphère électrisée dans la balance de torsion, et l'on mesure exactement la *charge* qu'elle a *retenue* pendant l'opération. Dans une série d'expériences conduites suivant cette méthode, et dans lesquelles la pression a varié entre 5 et 768 millimètres, M. Matteucci a trouvé que, la charge communiquée restant *constante*, les quantités d'électricité *retenues* par la sphère métallique variaient dans les mêmes rapports que les pressions ou les densités de la masse gazeuse ambiante. La charge électrique d'un conducteur placé dans un milieu gazeux, en présence et à une distance constante d'un autre conducteur en communication avec le sol, ne peut donc pas dépasser une *certaine tension* qui dépend de la *densité* du gaz ambiant; au-dessus de cette *tension limite* la décharge s'opère. Or nous avons vu (page 92) que, d'après les recherches de M. Faraday, le pouvoir inducteur des gaz est indépendant de leur densité. La *tension limite* déterminée par M. Matteucci est donc la mesure de la *résistance* du gaz au passage de l'électricité, et cette *résistance* est elle-même proportionnelle à la *densité* de l'atmosphère gazeuse.

Des expériences de H. Davy, déjà anciennes et bien connues, dont nous parlerons avec détail dans le chapitre de la troisième section consacré à l'étude de la lumière électrique, ont établi que le vide barométrique, refroidi à 29° au-dessous de zéro, livre passage à la décharge des machines électriques et des condensateurs. De ces faits et des observations précédentes de M. Matteucci il est permis de conclure que :

1° L'induction électro-statique peut, comme la pe-

santeur et l'action magnétique, s'exercer à travers un espace vide de toute matière pondérable. Ces forces naturelles sont, d'ailleurs, soumises à la même loi ; l'intensité de leur action varie en raison inverse du carré de la distance.

2° L'espace vide de toute matière pondérable n'oppose aucune résistance au passage de l'agent électrique. Du moment que le vide se fait entre deux corps dont les états électriques sont contraires, ils doivent se décharger brusquement l'un sur l'autre.

M. Matteucci a aussi étudié la marche de la perte lente qu'éprouve la charge *limite* des conducteurs dans des atmosphères gazeuses à divers degrés de pression. A cet effet, il plaçait sous une cloche de verre un petit électroscope auquel il communiquait une charge électrique. La divergence des feuilles d'or décroissait d'autant moins vite que la raréfaction de l'air de la cloche était plus considérable. La *vitesse* de la perte lente qu'éprouvent les charges électriques diminue donc avec la *densité* de l'atmosphère gazeuse ambiante. Ces résultats s'accordent avec ceux qu'avaient déjà obtenus Hawksbée, Gray, MM. Harris, Becquerel, Turner, etc., avec des électroscopes placés sous des cloches dans lesquelles l'air était raréfié avec une machine pneumatique, et avec ce que nous avons dit (page 28 et suiv.) du mode suivant lequel s'opère, à l'air libre, l'affaiblissement graduel des charges électriques des conducteurs.

Mode de propagation de l'électricité dans la décharge disruptive.— Les faits précédents nous permettent de nous rendre compte du mode de propagation de

l'électricité à travers un milieu isolant placé entre deux conducteurs qui échangent une décharge disruptive.

Soient (Fig. 96) A un conducteur isolé chargé d'électricite positive, et B un autre conducteur en communication avec le sol ; ces deux conducteurs sont séparés par un

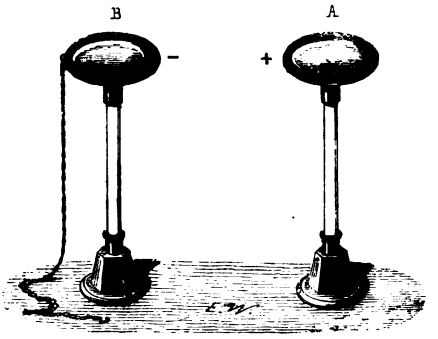


Fig. 96.

isolant quelconque solide, liquide ou gazeux Du moment que ces deux corps sont en présence, les molécules du diélectrique interposé se polarisent : A agit sur B par induction ; une charge d'électricité négative apparaît à la surface de B. Si nous divisons le corps isolant placé entre ces deux conducteurs en tranches parallèles et verticales, il est nécessaire, pour que l'équilibre existe, que la *somme* des tensions polaires des molécules soit la même dans toutes les tranches. Mais, dans la portion polarisée de cette masse diélectrique, chaque molécule est un centre d'action qui influe sur l'état final des molécules voisines dans toutes les directions. Dans les sections verticales de la masse diélectrique, l'étendue de la sur-

face comprise entre les lignes extrêmes de polarisation ne doit donc pas être partout la même, elle doit acquérir son *maximum* vers le milieu de la distance qui sépare les deux conducteurs, et, de là, aller en se rétrécissant à mesure qu'on se rapproche du corps inducteur A et du corps induit B. De ces deux considérations il résulte que, dans une même tranche verticale, la tension polaire varie d'une molécule à l'autre, et que les molécules les plus fortement polarisées sont situées dans le voisinage des conducteurs A et B. Tant que la tension polaire des molécules du corps isolant ne dépasse pas sa résistance au passage de l'électricité, l'équilibre électrique se maintient dans la masse polarisée, et les conducteurs conservent leurs charges sans affaiblissement. Si nous rapprochons les deux conducteurs, l'action inductrice de A sur B et la polarisation du diélectrique interposé acquièrent un plus haut degré d'intensité; il arrive un moment où, dans un point de cette masse isolante, la tension polaire dépasse le degré compatible avec le maintien de l'équilibre moléculaire. Alors une *rupture*, une *véritable solution de continuité*, est produite dans le diélectrique placé entre les conducteurs, et l'agent électrique se précipite dans le *vide* de *cette fissure*, soit *seul*, soit entraînant avec lui des particules pondérables violemment arrachées de la surface des conducteurs; la décharge disruptive s'effectue avec tous les effets qui la caractérisent.

Examinons, en particulier, le cas où les deux conducteurs en présence, l'inducteur A et l'induit B, sont environnés d'air. Au moment de la décharge disruptive, il s'établit, dans la masse gazeuse et dans une direction dé-

terminée, une *rupture*, une *solution de continuité*. La condition de production de cette *fissure*, à travers laquelle l'agent électrique se précipite, est un degré de polarisation des molécules gazeuses suffisant pour les écarter violemment les unes des autres. Or nous savons que le pouvoir inducteur des gaz est indépendant de leur densité; il en résulte que, pour une *même* charge inductrice, la *somme* des tensions polaires des molécules d'une section verticale de la masse gazeuse pratiquée à une distance *déterminée* des corps A et B reste *constante;* par conséquent, l'état polaire de chacune des molécules contenues dans cette tranche atteint un degré d'autant plus élevé que leur nombre est moins considérable, ou que la densité du gaz est plus faible. Ainsi, à mesure que la raréfaction de l'air augmente, d'une part l'effort nécessaire pour écarter ses molécules diminue, et d'autre part il suffit d'une charge plus faible pour leur communiquer une intensité *déterminée* de tension polaire. Pour cette double raison, conformément aux données de l'expérience, la quantité d'électricité, nécessaire pour produire une décharge disruptive entre deux conducteurs dont la distance reste *invariable*, doit diminuer en même temps que la densité du milieu gazeux interposé.

Quand la charge inductrice est considérable, et qu'il s'établit dans la masse d'air polarisée une *seule fissure*, les molécules sont fortement écartées, l'électricité se précipite dans le *vide* de la solution de continuité, et en suit tous les contours; dans ce cas, la décharge se fait par une *étincelle unique*, très brillante, et le *résidu* d'électricité qui reste sur le conducteur A est très faible. La marche

en *zigzag* de l'étincelle dépend de la forme de la fissure déterminée, sans doute, elle-même par la distribution des lignes de plus forte tension polaire des molécules dans la masse gazeuse interposée. Ce déplacement brusque, instantané, des molécules gazeuses, est nécessairement suivi d'un mouvement vibratoire qui explique le bruit sec dont l'étincelle est accompagnée.

Sous l'influence de certaines conditions expérimentales que nous analyserons plus tard, il peut se produire en même temps *plusieurs fissures* dans la masse d'air placée entre les conducteurs. La décharge se fait alors par plusieurs voies à la fois, et le phénomène lumineux qui l'accompagne prend la forme d'une *aigrette*. Bien que les voies d'écoulement soient multiples; cependant, comme l'effort disruptif est disséminé, l'écartement des molécules d'air est moins considérable, le vide à travers lequel passe l'électricité ne persiste pas assez longtemps pour qu'elle puisse s'écouler tout entière, la décharge est moins complète, et le *résidu* qui reste à la surface du conducteur A est plus considérable que dans le cas d'une *seule et forte étincelle*. Quand on détermine ainsi la formation d'une *aigrette* à l'extrémité du conducteur d'une machine en activité, il s'établit entre ce conducteur et le corps induit une série de décharges disruptives incomplètes qui, quoique distinctes, se succèdent pourtant assez rapidement pour donner à l'*aigrette* l'apparence d'une lueur continue accompagnée d'un bruit musical. Nous nous contenterons ici d'avoir indiqué le mécanisme de formation de l'*étincelle* et de l'*aigrette*, nous proposant d'en faire une étude détaillée dans la troisième

section, à propos des phénomènes lumineux déterminés par le passage de l'électricité à travers les milieux isolants.

De la distance explosive dans l'air. — On appelle *distance* ou *portée explosive* l'écartement *maximum* qui, pour une charge donnée, peut exister entre deux conducteurs électrisés au moment où ils échangent une *décharge disruptive*. Pour des charges électriques et des conducteurs donnés, il est évident que la *distance explosive* est d'autant plus grande que le milieu oppose lui-même *moins de résistance* au passage de l'électricité.

M. Harris a publié, dans les *Transactions philosophiques* pour 1834, une belle étude des conditions qui font varier la distance explosive. Dans ses recherches, la décharge s'opérait entre deux sphères métalliques en communication l'une avec l'armure intérieure, l'autre avec la garniture extérieure d'une bouteille de Leyde. La distance de ces deux boules était mesurée avec un appareil micrométrique. Dans chaque essai, on déterminait exactement la charge communiquée à la garniture intérieure. Il résulte des expériences de M. Harris que :

1° Lorsque la *température* et la *pression* restent les mêmes, c'est-à-dire lorsque la *densité* de l'air ne varie pas, la distance explosive est proportionnelle à la quantité d'électricité accumulée sur la garniture intérieure de la bouteille. Dans une bouteille de Leyde, dont la surface des garnitures et l'épaisseur de la lame de verre ne varient pas, la distance explosive est donc, comme la charge elle-même, proportionnelle à la tension accusée par son ar-

mure intérieure. Cette loi a été vérifiée par M. Masson dans ses études de photométrie électrique (1).

2° La *température* restant la même, pour *une charge donnée*, la distance explosive est inversement proportionnelle à la *pression* que l'air supporte ou à sa *densité*. Ainsi, pour la même charge communiquée à la même bouteille, quand la densité de l'air tombe de 1 à 1/2, la distance explosive augmente dans le rapport de 1 à 2.

Cette proposition peut être présentée sous cette autre forme : La distance explosive reste constante quand la *charge* de la bouteille varie proportionnellement à la *densité* de l'air. M. Masson (2) a vérifié aussi l'exactitude de cette loi.

3° L'élévation de température de l'air, en *vase clos*, n'exerce aucune influence sur la distance explosive ; mais, dans un *vase ouvert*, la distance explosive augmente en même temps que la température de l'air s'élève. Ce dernier résultat indique que la résistance opposée par l'air à la décharge disruptive ne dépend pas de la *pression* qu'il exerce sur la surface des conducteurs, mais de sa *densité*, ou du nombre de molécules pondérables que contient un volume donné de ce gaz. Ces résultats concordent merveilleusement avec ce que nous avons dit plus haut du mode de propagation de l'électricité dans la *décharge disruptive*.

M. Riess (3) a publié, sur la décharge des batteries

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1845, t. XIV, page 192 ; 1850, t. XXX, p. 27.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1850, t. XXX, p. 41.

(3) *Ann. de Poggendorff*, t. XL.

électriques, un travail de la plus haute importance. D'après ses recherches, la distance explosive d'un condensateur est représentée par la formule suivante :

$$d = b\frac{Q}{s},$$

dans laquelle d est la distance explosive, c'est-à-dire la distance qui sépare les deux boules de l'appareil micrométrique entre lesquelles la décharge a lieu ; Q, la quantité d'électricité, mesurée avec la bouteille électrométrique, qui existe sur l'armure intérieure de la batterie; s, la surface de cette armure intérieure, ou la somme de toutes les armures intérieures des jarres qui composent la batterie. b est une *constante* qu'on détermine expérimentalement pour chaque condensateur; c'est la distance explosive correspondante à l'unité de charge répandue sur l'unité de surface de l'armure du condensateur.

Dans cette formule, $\frac{Q}{s}$ est évidemment l'épaisseur de la couche électrique répandue sur l'unité de surface, ou la *tension totale* du condensateur. D'ailleurs, cette *tension totale* est (p. 131) proportionnelle à la tension accusée par l'armure interne qui joue le rôle de *collecteur*. On peut donc dire que la distance explosive du condensateur est proportionnelle à la *tension* accusée par celle de ses garnitures qui est en communication avec la source électrique. La formule de M. Riess n'est donc que la traduction algébrique de la première loi de M. Harris.

Cela posé, b étant déterminé, et deux des trois quantités d, Q, s étant connues, la formule de M. Riess donne le moyen de trouver exactement la valeur de la troisième.

Dans un travail postérieur sur le même sujet (1), M. Riess a démontré que :

1° La distance explosive d'une batterie est *indépendante* de la *nature* et de la *longueur* de l'arc conducteur qui établit la communication entre les deux armures. Ainsi, pour une *même* charge de la batterie, la distance explosive est restée rigoureusement la *même* avec trois arcs de jonction successivement essayés et composés, le premier d'un fil de cuivre de 4 lignes de longueur et de 0,50 de ligne de diamètre ; le second d'un fil de platine de 102 pouces de longueur et de 0,052 de ligne de diamètre ; le troisième d'une colonne d'eau de 8,3 pouces de longueur et de 4,5 lignes de diamètre.

2° Quand l'étincelle éclate entre deux *boules métalliques* et à la *distance explosive*, la fraction de la charge totale qui disparaît et est neutralisée s'élève à $\frac{11}{13} = 0,846$, quels que soient la nature, la longueur et le diamètre de l'arc *métallique* de communication établi entre les deux armures. Cette fraction reste sensiblement la même quand cet arc de communication présente des *interruptions* dans son trajet.

Après une décharge opérée à la *distance explosive*, à travers un circuit *métallique* quelconque, la batterie conserve donc toujours les $\frac{2}{13} = 0,154$ de sa charge primitive. Pour que ce *résidu* d'électricité produise des décharges *secondaires*, il faut ramener les boules à une distance moindre que la *distance explosive primitive*.

(1) *Archives de l'électricité*, 1841, t. I, p. 425.

3° Lorsque l'arc de communication est un tube de verre plein d'eau, la distance explosive reste la même, mais la batterie ne perd plus que les $\frac{5}{8} = 0,625$, et conserve, par conséquent, les $\frac{3}{8} = 0,375$ de sa charge.

La différence constatée entre ces deux derniers résultats pouvait parfaitement être prévue. Dans le cas d'un arc métallique, une plus forte quantité d'électricité se précipite instantanément dans la fissure produite à travers la masse d'air, les molécules gazeuses sont plus fortement écartées, l'écoulement est plus facile ; la décharge peut donc s'effectuer d'une manière plus complète, et le *résidu* doit être moins considérable.

Résistance des corps au passage de la décharge disruptive. — M. Faraday (1) est parti des lois découvertes par M. Harris pour mesurer la résistance des différents gaz au passage de l'électricité. L'appareil dont il s'est servi dans ses recherches est représenté figure 97.

A est un vase de verre fermé au moyen de deux plaques métalliques C et B. A travers la plaque supérieure, passe, à frottement dur, une tige métallique *d* terminée à sa partie inférieure par une petite boule métallique *l*. Une grosse boule métallique L repose sur la plaque métallique C; cette partie de l'appareil est portée sur un pied métallique qui permet de faire le vide et d'introduire différents gaz dans le récipient de verre A. *l'* et L' sont deux autres boules métalliques vissées à des tiges métalliques verticales qui, elles-mêmes, sont soutenues par des supports isolants *h*

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 440.

et *i*. D'ailleurs la petite boule *l'* peut, à volonté, être éloignée ou rapprochée de la grosse boule L'. Deux chaînes

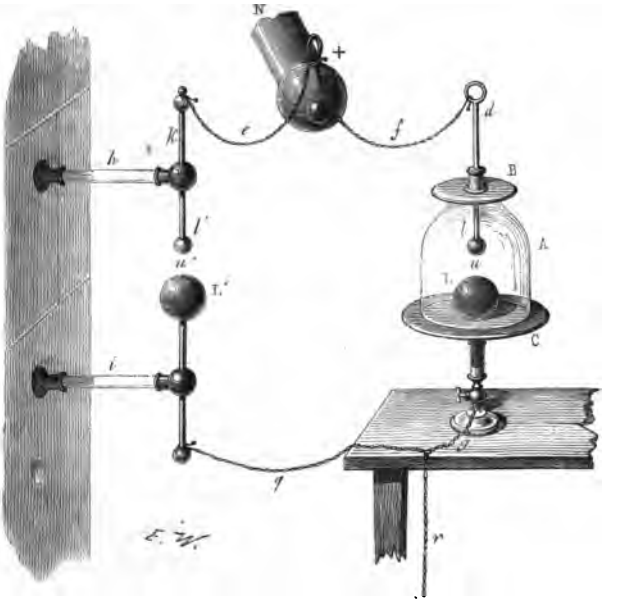


Fig. 97.

métalliques *e* et *f* font communiquer les deux petites boules *l*, *l'* avec le conducteur N d'une machine électrique; des chaînes métalliques *g*, *q*, *r*, font communiquer les grosses boules L, L' avec le sol. *u* et *u'* sont les distances qui séparent les boules supérieures des boules inférieures.

	mm	
La boule *l* avait.....	23,6	de diamètre.
La boule *l'*.....	24,2	—
La boule L.....	51,3	—
La boule L'.....	49,5	—

Il est évident que la décharge de la machine se fera entre l et L, ou entre l' et L', suivant que l'électricité trouvera plus de facilité à traverser le premier intervalle u ou le second u'. Mais, si les résistances sont les mêmes en u et en u', la décharge se partagera également entre les deux systèmes des boules, et l'étincelle se montrera, à la fois et avec la même intensité, des deux côtés; à ce moment-là, les *résistances spécifiques* du gaz contenu dans le récipient A et de l'air qui entoure les boules l', L' seront *en raison inverse* des distances correspondantes u et u'. Si donc l'intervalle u reste *constant* et égal à 16 millimètres, et si l'on détermine l'intervalle u' pour lequel l'étincelle se partage également entre les deux systèmes des boules, le rapport $\frac{u'}{u} = \frac{u'}{16}$ sera la *résistance spécifique* du gaz contenu dans le récipient A, celle de l'air étant prise pour l'*unité*.

Partant de ces principes incontestables, M. Faraday a successivement essayé plusieurs gaz qu'il introduisait dans le récipient A après les avoir bien desséchés; d'ailleurs la *pression* et la *température* étaient les mêmes pour les gaz du récipient et pour l'air extérieur. L'intervalle u restant *constant* et égal à 16 millimètres, il déterminait, chaque fois, la plus petite valeur de u' pour laquelle l'étincelle passait *toujours* à travers le gaz du récipient, puis la plus grande valeur de u' pour laquelle l'étincelle passait *toujours* à travers l'air entre l' et L'. Évidemment la moyenne de ces deux distances est la valeur de u' pour laquelle l'étincelle se serait partagée également entre les deux systèmes de boules, ou pour laquelle la résistance aurait été la même des deux côtés. D'ailleurs, les

expériences étaient disposées de manière à communiquer, tantôt de l'électricité positive et tantôt de l'électricité négative, aux petites boules l, l'. Le tableau suivant contient les résultats de ses observations.

	Densité.		Résistance spécifique.
Air extérieur.....	1	.....	1
Oxygène	1,10563	Électricité positive.	0,815
		Électricité négative.....	0,823
Azote.....	0,97137	Électricité positive.	0,992
		Électricité négative.....	1 040
Hydrogène.....	0,06926	Électricité positive.	0,597
		Électricité négative	0,444
Acide carbonique....	1,5290	Électricité positive.	1,032
		Électricité négative	0,952
Gaz oléfiant.....	0,9852	Électricité positive.	1,200
		Électricité négative	1,177
Gaz du charbon	»	Électricité positive.	0,790
		Électricité négative	0,847
Gaz acide chlorhydriq.	1,2474	Électricité positive.	1,782
		Électricité négative	1,161

M. Faraday fait observer lui-même que son procédé d'expérimentation ne fournit pas des mesures très exactes, car souvent les distances explosives entre les boules l' et L' varient dans des limites assez considérables sans cause appréciable. Il suffit, en effet, d'un changement dans l'état hygrométrique de l'air, d'un peu de poussière autour d'un des deux systèmes de boules, d'une électrisation plus ou moins forte des parois du récipient A, pour troubler les résultats. D'ailleurs, l'étincelle à l'air libre ne suit pas constamment une ligne droite, et ne mesure pas toujours la plus courte distance entre les boules l' et L'. Il a constaté, en outre, que l'étincelle a une tendance mar-

quée à se reproduire, malgré le changement d'intervalle, du côté où elle s'est montrée d'abord; cela tient, sans doute, à une altération de la surface des boules métalliques. Pour démontrer l'exactitude de ces critiques, il suffit de rapporter le résultat suivant donné par M. Faraday :

La résistance spécifique de l'*air libre* étant....		1
La résistance spécifique de l'*air contenu dans le vase* A est	pour l'électricité positive	1,121
	pour l'électricité négative	1,024

Si l'air, autour des boules *l*, L, n'oppose pas la même résistance au passage de l'électricité qu'autour des boules *l'*, L', cela ne peut provenir évidemment que de causes perturbatrices inhérentes au procédé expérimental lui-même.

Bien que les nombres donnés par M. Faraday ne puissent pas être acceptés comme l'expression rigoureuse de la résistance spécifique des divers gaz, cependant il est permis de déduire de ses expériences les propositions suivantes :

1° Tous les gaz n'opposent pas la même résistance au passage de l'électricité; quoique l'hydrogène, le plus léger des gaz, soit celui dont la *résistance spécifique* est la plus faible, il n'y a cependant pas de relation constante entre le *pouvoir isolant* et la *densité* des divers gaz.

2° Le même gaz n'est pas également *isolant* pour les deux électricités : les uns (hydrogène, acide carbonique, gaz oléfiant, gaz chlorhydrique) livrent moins facilement passage à l'électricité positive qu'à l'électricité négative ; les autres, placés dans les mêmes circonstances, se conduisent d'une manière inverse.

Dans ses importantes recherches de photométrie électrique (1), M. Masson a étudié la *résistance spécifique* de divers gaz et de divers liquides. Ses déterminations diffèrent notablement de celles de M. Faraday. Cependant ces deux physiciens s'accordent pour attribuer à l'air une résistance spécifique plus grande que celle de l'hydrogène, et plus faible que celle de l'acide carbonique. M. Masson a constamment opéré avec de l'électricité positive; le tableau suivant contient le résultat de ses recherches.

	Résistance spécifique.
Air	1,00
Hydrogène	0,98
Acide carbonique	1,13
Éther	7,40
Eau	12,30
Alcool	13,00
Essence de térébenthine	15,50

Il serait inutile de pousser, ici, plus loin l'étude de la résistance opposée par les divers corps au passage de l'électricité. Cette question se présentera de nouveau à propos de la transmission des courants fournis par les piles électriques; alors seulement nous posséderons les éléments nécessaires pour la traiter dans toute sa généralité et avec les détails convenables.

De quelques circonstances qui influent sur la décharge. — M. Faraday a fait une étude très détaillée des influences qui favorisent et contrarient la décharge électrique. Nous nous contenterons de rapporter ici les résultats suivants de ses nombreuses expériences.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1850, t. XXX, p. 43 et 49.

Mettons en présence deux sphères métalliques, de diamètre inégal (Fig. 98), séparées par de l'air et chargées de fluides de noms contraires; si l'électricité positive est

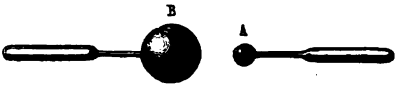


Fig. 98.

accumulée sur la petite sphère A, l'étincelle est beaucoup plus longue que dans le cas inverse.

Faisons communiquer l'une des sphères avec la source électrique, et l'autre avec le sol. La petite sphère A étant *positive;* dans le cas où cette sphère A est électrisée *directement* et joue le rôle de corps *inducteur*, l'étincelle est beaucoup plus longue que si elle communique avec le sol et est électrisée par *induction*. On observe une différence du même genre, mais moins prononcée, quand la petite sphère A est *négative*, et joue successivement le rôle de corps *inducteur* et de corps *induit*.

De deux surfaces également conductrices et placées dans l'air, celle qui est *négative* se décharge à une tension un peu plus basse que celle qui est positive. Nous avons déjà signalé, d'après M. Matteucci, des faits analogues pour la déperdition lente des charges électriques. Mais, après la décharge, la surface positive retient un *résidu* d'électricité plus faible que la surface négative.

M. Faraday a successivement opéré dans l'air, le gaz oléfiant, l'acide carbonique, l'azote et l'hydrogène; il a vu que les effets varient avec la nature du gaz au sein duquel s'opère la décharge électrique. Dans l'air, le gaz

oléfiant et l'acide carbonique, la petite sphère A cède plus facilement son électricité quand elle est *négative* que quand elle est *positive;* dans l'azote et l'hydrogène, la décharge s'opère plus facilement si la petite sphère est *positive* que si elle est *négative*.

Conductibilité superficielle des corps isolants. — Quelle que soit leur nature, les corps isolants n'opposent jamais une résistance absolue au passage de l'électricité, et, dans les conditions ordinaires, ils en laissent écouler une certaine quantité par leur surface extérieure. La conductibilité superficielle des corps isolants peut être augmentée par des circonstances accidentelles : ainsi, quand des poussières adhèrent à leur surface, les supports des électroscopes et des machines perdent presque complétement leurs propriétés isolantes. Le même effet se produit constamment lorsque ces appareils sont introduits *froids* dans une pièce dont l'atmosphère est chargée de beaucoup de vapeur d'eau. Leur conductibilité superficielle, dans ce cas-là, est due à une fine rosée dont ils se recouvrent. Le verre doit à ses propriétés hygrométriques très marquées de condenser très facilement la vapeur répandue dans l'air environnant ; aussi ne fournit-il que des supports isolants très imparfaits, à moins qu'on n'ait le soin de recouvrir sa surface d'une couche de vernis à la gomme laque.

Dans ces dernières années, M. de Sénarmont (1) et M. Wiedemann (2) ont fait, presque en même temps, des recherches très intéressantes sur la conductibilité

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1850, t. XXVIII, p. 257.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1850, t. XXIX, p. 229.

superficielle des corps isolants. Les procédés employés par ces deux observateurs diffèrent beaucoup, cependant leurs résultats sont généralement concordants. Nous ne parlerons ici que des expériences de M. de Sénarmont; elles sont à la fois plus probantes et plus complètes.

Après avoir découpé, dans une feuille d'étain, un trou exactement circulaire, M. de Sénarmont colle cette feuille sur la surface plane d'un corps mauvais conducteur qu'elle enveloppe d'ailleurs entièrement. Au centre de l'ouverture de cette armure métallique, il place, normalement à la surface du corps mauvais conducteur, une pointe métallique, isolée, par laquelle arrive l'électricité. L'agent électrique ne peut s'écouler qu'en cheminant vers la circonférence, et en franchissant un espace non conducteur; il a donc à surmonter des résistances, et son passage s'accompagne de phénomènes de lumière. Toutes choses se trouvent, d'ailleurs, parfaitement semblables en tous sens; l'électricité arrive au centre d'un cercle, et la circonférence conductrice la sollicite également de tous côtés; elle ne peut donc avoir d'autres causes directrices déterminantes que des forces moléculaires, si elles existent, et des différences de conductibilité superficielle.

L'opération se fait sous le récipient de la machine pneumatique, l'armure métallique étant en communication avec le sol. Le flux silencieux et continu d'électricité dans l'air raréfié ne laisse, sur la surface du corps isolant, aucune trace permanente, mais il se manifeste, dans l'obscurité, par une lueur qui persiste pendant la durée entière de l'écoulement et en rend visibles toutes les particularités. Dans les expériences de M. de Sénarmont,

les diamètres des trous, pratiqués dans les armures métalliques des corps isolants, ont varié de 10 à 35 millimètres.

De ces expériences, M. de Sénarmont a déduit les conclusions suivantes :

1° Pour les corps homogènes (crown, flint, soufre, gomme laque, résine) et pour les cristaux du système régulier, la conductibilité superficielle est égale en tous sens et sur toutes les faces.

2° Pour les cristaux du système prismatique à base carrée et rhomboédrique :

a. La conductibilité est égale dans tous les sens sur les faces normales à l'axe de symétrie ;

b. Sur les faces parallèles à cet axe, il existe une direction de conductibilité *maximum* qui lui est parallèle ou perpendiculaire ;

c. Sur les faces inclinées à cet axe, il existe une direction de conductibilité superficielle *maximum* parallèle ou perpendiculaire à la projection de l'axe de symétrie, ou, en d'autres termes, à la trace de la section principale sur la face que l'on considère.

3° Pour les cristaux des autres systèmes, il existe, sur une face quelconque, une direction fixe de conductibilité *maximum*.

Quand la face contient dans son plan un ou deux axes de symétrie, cette direction est parallèle ou perpendiculaire à ces axes. Quand la face ne contient pas d'axes de symétrie dans son plan, la direction de conductibilité *maximum* ne peut être prévue *à priori ;* elle ne coïncide nécessairement ni avec les directions des axes d'élasti-

cité optique, ni avec les directions des axes de conductibilité thermique.

4° Pour des directions intermédiaires à celles du *maximum* et du *minimum*, la conductibilité superficielle dépend des rayons vecteurs d'une ellipse, comme ce *maximum* et ce *minimum* dépendent eux-mêmes des axes de cette ellipse.

Enfin, M. de Sénarmont fait observer que les résultats précédents ne sont réellement appréciables que quand on agit avec de l'électricité positive. L'électricité négative semble se propager avec la même facilité dans toutes les directions, aussi bien sur les surfaces des cristaux, quel que soit leur système, que sur celles des corps homogènes. Avec l'électricité négative, les différences de conductibilité superficielle, si elles existent, sont trop faibles pour être mises en évidence par le procédé employé.

NOTES DE LA PREMIÈRE SECTION.

NOTE A.

DE L'EMPLOI DE LA BALANCE DE COULOMB DANS LES RECHERCHES D'ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

La balance de Coulomb joue un rôle d'une grande importance dans les recherches relatives aux lois des actions électriques et de la distribution de l'électricité à la surface des conducteurs; nous croyons devoir exposer ici sommairement les considérations mathématiques très simples sur lesquelles repose son emploi.

I. — *Lois des actions électriques à distance.*

La figure (99) représente la projection sur un plan horizontal des principales parties de la balance de torsion. — O est la projection du fil de torsion. — A est la balle fixe du chargeur dont le centre est a. — B, B′ représentent la balle mobile dans deux positions d'équilibre; b, b' sont les positions correspondantes de son centre. — Ob, Ob' sont les deux positions de l'axe de l'aiguille horizontale isolante. — Enfin, MN est la circonférence sur laquelle se meut le centre de la balle mobile B, quand elle est repoussée ou attirée par la balle du chargeur A.

Soient maintenant :

L'angle $bOa = \alpha$,
L'angle $b'Oa = \alpha'$,
L'arc $ba = c$,
L'arc $b'a = c'$,
Et le rayon $Ob = r$.

EF étant une tangente au cercle MN menée au point b, nous aurons nécessairement :

$$DbE = Fba = \frac{bOa}{2} = \frac{\alpha}{2}.$$

Si nous représentons, par d et d', les longueurs des cordes

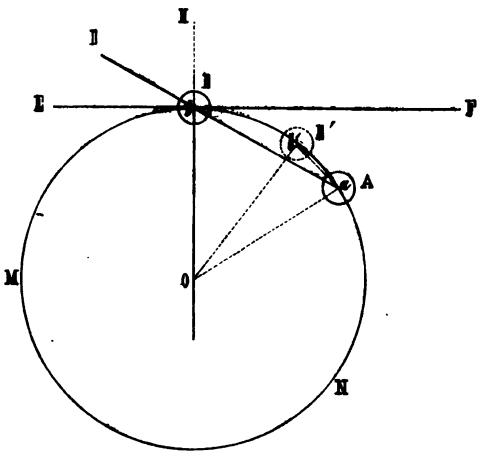


Fig. 99.

ab, ab' qui mesurent les distances, en ligne droite, du centre

de la balle fixe A au centre la balle mobile dans les deux positions B et B', nous aurons :

$$d = 2\,r.\sin\frac{\alpha}{2}, \qquad d' = 2\,r.\sin\frac{\alpha'}{2}.$$

La balle mobile et la balle du chargeur se repoussent mutuellement.

1° Soit k le nombre de degrés dont il faut tourner le tambour de la balance pour maintenir la balle mobile dans la position B, à une distance d de la balle A du chargeur ; la torsion totale supportée par le fil suspenseur sera $t = c + k$.

La balle mobile B sera alors sollicitée à se rapprocher du chargeur A par la force de torsion, $t = c + k$, appliquée au point b et dirigée suivant la tangente bF. Cette force de torsion devra être équilibrée par la répulsion mutuelle des deux balles A et B.

Mais si nous appelons f la répulsion des deux balles à la distance $ab = d$, nous voyons qu'elle agit sur B suivant bD, prolongement de ab. Cette force peut se décomposer en deux :

L'une agit suivant bH, tend à écarter l'aiguille de la balance de la normale, est détruite par la pesanteur et égale à :

$$f.\cos \mathrm{D}b\mathrm{H} = f.\sin \mathrm{D}b\mathrm{E} = f.\sin\frac{\alpha}{2}.$$

L'autre agit suivant bE, est directement opposée à la force de torsion et égale à :

$$f.\cos \mathrm{D}b\mathrm{E} = f.\cos\frac{\alpha}{2}.$$

Puisque l'aiguille de la balance est en équilibre, nous devons avoir :

$$f.\cos\frac{\alpha}{2} = t, \qquad \text{ou } f = \frac{t}{\cos\frac{\alpha}{2}}.$$

2° Ramenons maintenant la balle mobile dans la position B′. Soit k' le nombre de degrés dont le repère du tambour de la balance doit être écarté du zéro de l'échelle pour maintenir la balle en équilibre dans cette nouvelle situation. La torsion totale supportée par le fil suspenseur sera $t' = c' + k'$.

Si nous appelons f' la répulsion mutuelle des deux balles A et B′ quand elles sont ainsi maintenues à la distance $ab' = d'$, la condition d'équilibre sera nécessairement :

$$f'.\cos\frac{\alpha'}{2} = t', \quad \text{ou } f' = \frac{t'}{\cos\frac{\alpha'}{2}}.$$

Le rapport des forces répulsives de ces deux balles, agissant l'une sur l'autre aux distances d et d', sera donc :

$$\frac{f}{f'} = \frac{t.\cos\frac{\alpha'}{2}}{t'.\cos\frac{\alpha}{2}},$$

tandis que le rapport de ces distances elles-mêmes est :

$$\frac{d}{d'} = \frac{2r.\sin\frac{\alpha}{2}}{2r.\sin\frac{\alpha'}{2}} = \frac{\sin\frac{\alpha}{2}}{\sin\frac{\alpha'}{2}}.$$

Si donc les forces répulsives sont en raison inverse des carrés des distances des deux balles de la balance, les forces de torsion t, t', et les angles de déviation α, α', devront satisfaire à la condition suivante :

$$\frac{t.\cos\frac{\alpha'}{2}}{t'.\cos\frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin^2\frac{\alpha'}{2}}{\sin^2\frac{\alpha}{2}};$$

d'où : $$\frac{t}{t'} = \frac{\sin^2 \frac{\alpha'}{2} \cos \frac{\alpha}{2}}{\sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha'}{2}} = \frac{\sin \frac{\alpha'}{2} \operatorname{tang} \frac{\alpha'}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2} \operatorname{tang} \frac{\alpha}{2}}. \qquad (1)$$

L'expérience démontre qu'en effet, les torsions t, t' et les angles de déviation α, α' de la balle mobile satisfont à cette dernière équation.

Dans le cas où les angles $\frac{\alpha}{2}$ et $\frac{\alpha'}{2}$ sont très petits, leurs sinus et leurs tangentes sont sensiblement égaux aux arcs $\frac{c}{2}$ et $\frac{c'}{2}$ compris entre les côtés de ces angles. Si nous opérons cette substitution dans l'équation (1), nous trouvons :

$$\frac{t}{t'} = \frac{c'^2}{c^2}.$$

Ainsi, lorsque les angles d'écartement des deux balles sont petits, comme dans les expériences de Coulomb citées page 21, pour établir que les intensités des actions répulsives sont en raison inverse des carrés des distances qui séparent les corps électrisés, il suffit de constater que les torsions t, t', imprimées au fil suspenseur pour maintenir la balle mobile en équilibre, sont en raison inverse des carrés des arcs c et c' qui mesurent les angles de déviation de la balle mobile.

II. — *Intensité de l'action électrique à l'unité de distance.*

Sachant que les intensités des attractions et de répulsions sont en raison inverse des carrés des distances, il est facile de déduire, d'une expérience faite avec la balance de torsion, l'intensité de l'action électrique à l'*unité de distance* en fonction de la torsion du fil suspenseur et de l'angle d'écartement de l'aiguille mobile.

Soit F l'intensité *cherchée* de l'action électrique à l'*unité de distance*.

La balle mobile étant maintenue en B à une distance $ab = d = 2r \sin \frac{1}{2} \alpha$, soit t la torsion *totale* que supporte le fil suspenseur.

A la distance d, l'intensité F devient nécessairement :

$$\frac{F}{d^2} = \frac{F}{4r^2 . \sin^2 \frac{1}{2} \alpha}.$$

Nous savons, d'ailleurs, que cette dernière force se décompose en deux dont l'une, agissant suivant bH, est détruite par la pesanteur, tandis que l'autre, égale à $\frac{F . \cos \frac{1}{2} \alpha}{4r^2 . \sin^2 \frac{1}{2} \alpha}$, agit suivant bE et fait équilibre à la torsion du fil. Nous aurons donc :

$$\frac{F . \cos \frac{1}{2} \alpha}{4r^2 . \sin^2 \frac{1}{2} \alpha} = t ;$$

d'où :

$$F = \frac{4r^2 . \sin^2 \frac{1}{2} \alpha}{\cos \frac{1}{2} \alpha} t,$$

d'ou, enfin :

$$F = 4r^2 . \sin \frac{1}{2} \alpha \tang \frac{1}{2} \alpha . t. \qquad (2)$$

Tant que l'aiguille mobile ne change pas de longueur, la quantité $4r^2$ reste constante, et, par conséquent, l'intensité de l'action électrique, à l'*unité de distance*, est proportionnelle au produit :

$$\sin \frac{1}{2} \alpha \tang \frac{1}{2} \alpha . t.$$

Dans le cas où les déviations angulaires sont petites, on peut remplacer le sinus et la tangente par l'arc $\frac{c}{2}$ qui est compris entre les côtés de l'angle $\frac{1}{2} \alpha$; alors l'équation (2) devient :

$$F = r^2 . c^2 . t ;$$

et comme r est constant, l'intensité de l'action électrique, à l'*unité de distance*, est proportionnelle à la quantité

$$c^2 . t,$$

c'est-à-dire au produit du carré de l'arc de déviation de l'aiguille mobile par la torsion que supporte le fil suspenseur, quand cette aiguille mobile est en équilibre.

III. — *Mesure de la tension électrique.*

La balance de torsion est souvent employée pour mesurer l'épaisseur de la couche électrique accumulée en divers points donnés de la surface d'un corps, ou, en d'autres termes, la *tension* de la charge électrique en ces points. On peut, en cas pareil, recourir à deux procédés différents :

1° La balle mobile B de la balance est chargée d'une quantité d'électricité connue et constante e' ; on touche successivement, avec la balle A du chargeur, les divers points de la surface d'un corps électrisé ; chaque fois, on rapporte la balle A dans la balance, et l'on mesure la torsion totale t qu'il faut imprimer au fil pour maintenir la balle mobile B à une distance angulaire *constante* α. Il s'agit de déduire de ces expériences la tension e de l'électricité accumulée, à chaque épreuve, sur la boule A.

D'après ce que nous avons vu page 26 et dans le paragraphe précédent, l'action réciproque des deux charges e et e', à l'*unité de distance*, serait :

$$e e' = 4r^2 . \sin \tfrac{1}{2} \alpha \tang \tfrac{1}{2} \alpha . t;$$

d'où :

$$e = \frac{4r^2 . \sin \frac{1}{2} \alpha \tang \frac{1}{2} \alpha}{e'} t. \qquad (3)$$

La longueur de l'aiguille r, l'angle de déviation α et la charge e' de la balle mobile B étant des quantités constantes, les valeurs de e, à l'*unité de distance*, ou les *tensions* des

charges successives communiquées à la boule A du chargeur et, par conséquent, les *tensions* des divers points explorés de la surface du corps électrisé, seront proportionnelles aux valeurs de la torsion *totale t* nécessaire pour maintenir *constante* la déviation angulaire α de l'aiguille mobile.

2° Au lieu de communiquer à la balle mobile une charge constante, on la laisse ordinairement à l'état neutre. Dans ce cas, après avoir mis la balle A en contact avec un point du corps électrisé, on l'introduit dans la balance; une partie de sa charge e passe sur la balle B qui est repoussée, et l'on imprime, au fil suspenseur, la torsion nécessaire, t, pour que la déviation de l'aiguille mobile conserve une valeur *constante* α.

Soit m la fraction constante de la charge e de la balle A qui, au moment du contact des deux balles, passe sur B. Après leur séparation, les charges des deux balles seront $(1-m)\,e$ pour A, et me pour B ; leur action réciproque, à l'*unité de distance*, sera donc :

$$(1-m)\,e\,.\,me = 4r^2.\sin\tfrac{1}{2}\alpha\,\mathrm{tang}\,\tfrac{1}{2}\alpha\,.\,t;$$

d'où :
$$e^2 = \frac{4r^2.\sin\frac{1}{2}\alpha\,\mathrm{tang}\,\frac{1}{2}\alpha}{m\,(1-m)}\,t,$$

d'où, enfin :
$$e = \sqrt{\frac{4r^2.\sin\frac{1}{2}\alpha\,\mathrm{tang}\,\frac{1}{2}\alpha}{m\,(1-m)}} \times \sqrt{t}. \qquad (4)$$

Toutes les quantités contenues sous le premier radical étant constantes, il en résulte que les valeurs de e, ou les *tensions* des charges successives communiquées à la balle A du chargeur, sont, dans ce procédé, proportionnelles à la *racine carrée* de la torsion *totale t* nécessaire pour maintenir *constante* la déviation de l'aiguille mobile.

Au lieu de ramener l'aiguille mobile à une déviation constante, on peut, après le contact des deux balles, se contenter d'ob-

server l'arc d'*impulsion* c que décrit la balle mobile B. Dans ce cas évidemment :

La torsion t du fil est mesurée par le nombre de degrés que contient l'arc d'impulsion c,

Et l'angle de déviation α est variable et mesuré par ce même arc d'impulsion c.

Remplaçant t par c dans l'équation (4), nous aurons, pour mesurer la *tension cherchée :*

$$e = \sqrt{\frac{4r^2 \cdot \sin \frac{1}{2} \alpha \operatorname{tang} \frac{1}{2} \alpha \cdot c}{m\,(1 - m)}}. \qquad (5)$$

Les quantités $4r^2$ et $m(1-m)$ étant constantes, il résulte de l'équation (5) que la *tension cherchée* est proportionnelle à :

$$\sqrt{\sin \tfrac{1}{2} \alpha \operatorname{tang} \tfrac{1}{2} \alpha \cdot c}.$$

Enfin, si les arcs d'*impulsion* sont assez petits pour que le $\sin \frac{1}{2}\alpha$ et $\operatorname{tang} \frac{1}{2} \alpha$ puissent, sans erreur sensible, être remplacés par l'arc $\frac{c}{2}$ qui mesure l'angle $\frac{\alpha}{2}$, cette substitution dans l'équation (5) donnera :

$$e = \sqrt{\frac{4r^2 \frac{c}{2} \frac{c}{2} c}{m\,(1-m)}};$$

d'où :

$$e = \sqrt{\frac{r^2}{m\,(1-m)}} \times \sqrt{c^3}. \qquad (6)$$

Toutes les quantités contenues sous le premier radical étant constantes, il résulte de l'équation (6) que les valeurs de e, ou les *tensions* successives communiquées à la balle du chargeur, sont proportionnelles aux racines carrées de la troisième puissance des *arcs d'impulsion.*

NOTE B.

THÉORIE DU CONDENSATEUR.

Avant les belles découvertes de M. Faraday sur l'*induction électro-statique*, et les recherches plus récentes de M. Riess, les physiciens admettaient que l'électricité, accumulée sur la surface des conducteurs, pouvait s'y trouver sous deux états. Dans un premier état, l'électricité traduisait sa présence par des phénomènes d'attraction et de répulsion, avait la propriété de passer, au contact apparent, d'un conducteur à l'autre, décomposait, par influence et à distance, le fluide neutre des conducteurs voisins; on disait alors que le corps était chargé d'*électricité libre*. Dans un deuxième état, l'électricité, quoique présente, n'exerçait aucune action sur les corps voisins; on disait alors que l'électricité avait perdu *toute sa tension*, qu'elle était *latente ou dissimulée*. Nous avons exposé (page 118 et suivantes) les raisons qui ne permettent plus d'admettre cet *état latent* de l'électricité; cependant nous croyons devoir consacrer cette note à la réproduction de la théorie du condensateur encore généralement professée, et fondée sur l'hypothèse de l'*électricité dissimulée*.

Lorsque (Fig. 100) on communique de l'électricité *positive* au plateau *collecteur* A d'un condensateur, cette charge positive décompose par influence le fluide neutre du plateau B et les deux électroscopes *a*, *b*, divergent à la fois. Si alors on met le plateau B en communication avec le sol, toute son électricité positive s'écoule dans le réservoir commun, mais il conserve toute l'électricité *négative* développée à sa surface par influence, et le plateau A ne perd rien de sa charge *positive*.

Cependant le pendule *b* tombe et reste à *zéro* comme si le pla-

teau B avait été ramené à l'*état neutre*, et, en même temps, la divergence du pendule *a* diminue comme si le plateau A avait perdu la majeure partie de sa charge. L'hypothèse de l'*électricité dissimulée* fournit une explication facile de ces phénomènes.

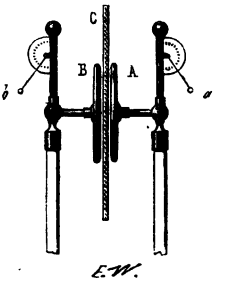


Fig. 100.

En effet, la charge *négative* de B, provenant uniquement de la décomposition par influence du fluide neutre de ce plateau, doit nécessairement être plus faible que la charge *positive* de A, puisque cette influence s'exerce à une distance qui ne saurait être moindre que l'épaisseur de la lame de verre interposée. Mais, à travers la lame de verre, l'électricité *positive* de A et la *négative* de B s'influencent réciproquement, et peuvent, sans se combiner, se *neutraliser* l'une l'autre. Dès lors, la charge *négative*, étant la plus faible, ne peut plus exercer aucune action sur les corps environnants, parce qu'elle est *complétement dissimulée*. Cette charge *négative* de B réagit à son tour sur la *positive* de A, et en fait passer la majeure partie à l'*état latent*. La tension s'affaiblit considérablement sur A ; cependant le pendule *a* conserve un certain degré de divergence, et traduit ainsi la présence, sur ce dernier plateau, d'un excès d'électricité positive qui a échappé à l'action de la charge *négative*, et est restée à l'*état libre*.

Une partie de la charge positive de A étant passée à l'*état latent*, ce plateau, mis de nouveau en communication avec la machine, peut recevoir une nouvelle dose de fluide libre; l'équilibre de tension se rétablit entre le plateau et la machine, et le pendule *a* reprend sa divergence première. Mais, en même temps, le pendule *b* s'écarte de sa position verticale, accusant la décomposition par influence d'une nouvelle dose de fluide neutre sur le plateau B. Si, alors, on touche ce dernier plateau avec le doigt, sa charge positive s'écoule dans le sol, et le pendule *b* retombe à *zéro;* de son côté, la divergence du pendule *a* diminue considérablement, mais cependant reste plus forte qu'après la première épreuve. Le plateau B gagne donc, dans cette seconde opération, une nouvelle dose d'électricité *négative complétement dissimulée* qui fait passer à l'*état latent* une partie de la *seconde charge positive* communiquée au collecteur A; ce dernier plateau peut ainsi recevoir de la machine une troisième charge.

Par une série d'opérations semblables, on peut donc accumuler successivement, sur A et sur B, des quantités nouvelles et décroissantes de fluide *positif* et de fluide *négatif*. Ainsi la charge *totale* du condensateur augmente graduellement, jusqu'à ce que la portion de la charge *positive* du collecteur A, qui reste *à l'état libre*, soit assez considérable pour mettre ce plateau en équilibre de tension avec la source électrique employée.

Disposons l'appareil comme l'indique la figure 101. Les plateaux A et B communiquent, d'une manière permanente, le premier avec la machine, et le second avec le sol; du moment que l'on met la roue de verre en rotation, l'électroscope de la machine et le pendule *a* du plateau collecteur s'écartent peu à peu de leur position verticale, tandis que le pendule *b* reste immobile. A mesure que l'électricité *positive* s'écoule de la machine sur le plateau A, elle passe *en partie* à l'*état latent*, et fixe sur B une charge correspondante d'électricité *négative complétement dissi-*

mulée. Quand la divergence du pendule *a* est égale à celle que peut atteindre l'électroscope de la machine séparée du condensateur, la surface du *collecteur* A contient une assez grande

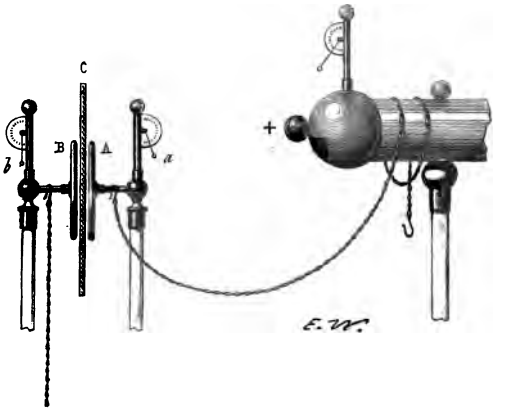


Fig. 101.

quantité de fluide *positif libre* pour être en équilibre de tension avec la source électrique; la charge du condensateur est à son *maximum*.

Dans cette manière de comprendre l'accumulation de l'électricité sur le condensateur, la lame de verre placée entre les deux plateaux joue un rôle purement *passif;* elle ne sert qu'à empêcher la recomposition des deux charges de noms contraires, et peut être remplacée par un corps quelconque opposant la même résistance au passage des fluides. Par le fait de la présence de la lame interposée, les actions réciproques des deux plateaux du condensateur s'exercent à une distance sensible. Dès lors, la charge *positive* accumulée sur A l'emporte en quantité sur la charge *négative* développée, retenue et *complétement dissimulée* par influence sur le plateau B. Récipro-

quement, la charge *négative* de B doit l'emporter sur la *fraction* de la charge *positive* de A qu'elle fait passer et retient à l'*état latent*. Enfin, quand la charge du condensateur a atteint son *maximum*, la quantité d'électricité *positive libre* qui existe sur A est précisément égale à la charge qu'aurait reçue ce plateau s'il avait été mis, *seul* et hors de la présence de B, en communication avec la machine. Cela posé, il est facile, dans l'hypothèse de l'*électricité latente*, de calculer le *maximum* de charge que l'appareil peut recevoir. Soient, en effet :

P, la quantité *totale* d'électricité *positive* accumulée sur le plateau A ;

N, la quantité d'électricité *négative complétement dissimulée* accumulée sur le plateau B.

m représentant une fraction plus petite que l'unité, puisque la charge N est plus faible que la charge P, nous aurons :

$$\frac{N}{P} = m,$$

et, de plus, la charge *négative* N du plateau B maintiendra à l'*état latent*, en A, une fraction P′ de la charge *positive totale* P, telle que nous aurons :

$$\frac{P'}{N} = m.$$

Appelons maintenant p la quantité d'électricité *positive* dont le plateau A se serait chargé s'il avait été mis, *seul* et hors de la présence de B, en communication avec la machine; nous aurons nécessairement, entre les quantités P, P′, N, p et m, les trois relations suivantes :

$$\frac{N}{P} = m, \qquad \frac{P'}{N} = m, \qquad P - P' = p.$$

Remplaçant, dans la troisième équation, P′ par sa valeur tirée de la seconde, nous aurons :

$$P - mN = p.$$

Remplaçant enfin, dans cette dernière équation, N par sa valeur tirée de la première, nous aurons :

$$\frac{P}{p} = \frac{1}{1 - m^2}.$$

$\frac{P}{p}$ est le rapport de la charge *totale* du plateau A quand il fait partie du condensateur à la charge qu'il acquerrait s'il était mis, *seul*, en communication avec la machine; ce rapport est toujours plus grand que l'unité, et représente ce qu'on appelle la *force condensante* de l'appareil. L'expression $\frac{1}{1 - m^2}$, de l'intensité de cette *force condensante* montre qu'elle augmente en même temps que la fraction m. D'ailleurs, la valeur de m est évidemment d'autant plus considérable que la distance des plateaux, ou l'épaisseur de la lame isolante interposée, est elle-même plus faible.

Puisque, dans l'hypothèse de l'*électricité latente*, le rôle de la lame isolante est purement *passif*, il résulte des considérations précédentes que l'amincissement de cette lame isolante serait le seul moyen d'augmenter la *force condensante* de l'appareil. Mais les expériences de M. Faraday prouvent que tous les *isolants* n'ont pas le même *pouvoir inducteur*, et que, par conséquent, l'intensité de la *force condensante* dépend aussi de la *nature* de la lame isolante employée. D'autre part, les recherches de M. Riess ont démontré que la formule $\frac{P}{p} = \frac{1}{1 - m^2}$ ne s'accorde pas avec les résultats de l'observation directe. Enfin, quand, avec

une machine puissante, on essaie de charger un condensateur *à saturation*, souvent la lame de verre cède à l'effort des électricités en présence, et est violemment brisée; les *tensions* des charges de noms contraires sont donc détournées dans une direction déterminée, s'exercent d'une armure à l'autre à travers la lame isolante interposée, mais il est impossible d'admettre que, dans le condensateur, les fluides électriques ne conservent pas toutes leurs propriétés caractéristiques. L'hypothèse de l'*électricité latente* est donc en contradiction avec les faits. Telles sont les raisons qui nous ont déterminé à rejeter la théorie du condensateur fondée sur cette hypothèse aujourd'hui inadmisible, et à la remplacer (pages 118 et suivantes) par une théorie nouvelle, plus en harmonie avec l'état actuel de la science, déduite, d'ailleurs, des belles découvertes de M. Faraday sur les propriétés des *diélectriques*.

DEUXIÈME SECTION.

MAGNÉTISME.

Les minerais ferrugineux de la formule Fe^3O^4 jouissent de la propriété d'attirer le fer et sa limaille; on leur donne le nom d'*aimants naturels*. L'acier, presque tous les composés ferrugineux, le nickel, le cobalt, le chrome, etc. (1), mis en présence de ces minerais, se comportent comme le fer, et sont, comme lui, appelés *substances magnétiques*. L'expérience démontre que l'action attractive des aimants s'exerce à travers le vide et à travers tous les corps gazeux, liquides ou solides, qui ne sont pas eux-mêmes *magnétiques*. A l'aide de procédés que nous décrirons plus tard, on peut communiquer, d'une manière permanente, à des aiguilles ou à des barreaux d'acier trempé, toutes les propriétés des aimants naturels. Ces aiguilles et ces barreaux sont alors dits *aimantés;* ils prennent le nom d'*aimants artificiels*, et nous serviront à étudier les lois des phénomènes magnétiques.

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

Une petite balle de fer A (Fig. 102) étant suspendue à un fil très flexible, présentons-la successivement aux

(1) Dans le chapitre de la troisième section consacré à l'étude de l'action du magnétisme sur tous les corps, nous donnerons une liste plus complète des substances *magnétiques*.

divers points de la surface d'un barreau aimanté. Bien que la distance entre l'aimant et ce pendule magnétique soit conservée la même dans tous les cas, la déviation de la balle A éprouve des variations considérables. Dans la

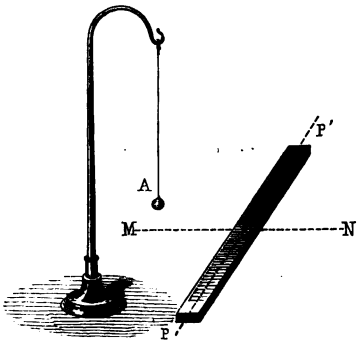


Fig. 102.

section MN perpendiculaire au milieu de l'axe de figure PP', l'action attractive est nulle; à partir de cette position, le pendule est d'autant plus fortement dévié de la verticale qu'il est présenté à une région du barreau plus rapprochée de ses extrémités.

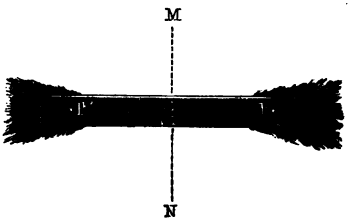


Fig. 103.

Le même fait peut être démontré en roulant un barreau aimanté dans la limaille de fer (Fig. 103); ou mieux

encore (Fig. 104), en recouvrant un aimant d'une feuille mince de carton à laquelle on imprime de légers chocs pendant que, à l'aide d'un tamis, on répand de la limaille de fer sur sa surface. La disposition qu'affectent les brins de

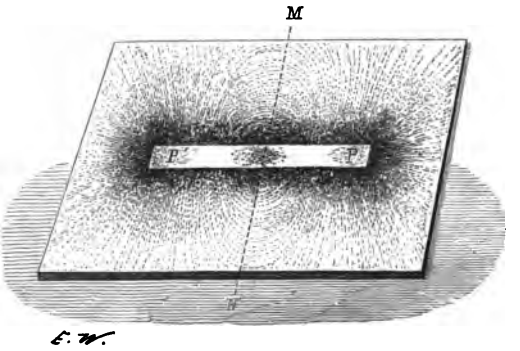


Fig. 104.

limaille prouve que la *section moyenne* MN est sans action, et que, vers les extrémités du barreau, il existe deux points P, P', situés sur l'axe de figure, qui sont des centres de plus forte attraction.

La *section moyenne* sans action prend le nom de *ligne neutre*, et les centres d'attraction P, P' sont appelés les *pôles* du barreau. Tout aimant naturel ou artificiel possède au moins *deux pôles*. Quand l'aimantation est régulière, l'aimant n'a que *deux pôles* situés sur son axe de figure et dans le voisinage de ses extrémités. Quand les minerais de fer ou les barreaux d'acier ont *plus de deux pôles*, on dit qu'ils sont irrégulièrement aimantés, ou qu'ils ont des *points conséquents*. Dans tous les cas, deux pôles consécutifs sont séparés par une ligne neutre ou sans action.

Au moyen d'une chape C (Fig. 105) de papier ou de cuivre, soutenue par un fil sans torsion, on suspend horizontalement un barreau aimanté. Le système entre en mouvement sous l'influence de la terre, et, après un certain nombre d'oscillations, le barreau s'arrête dans une position telle que son axe se dirige du sud au nord. Quand

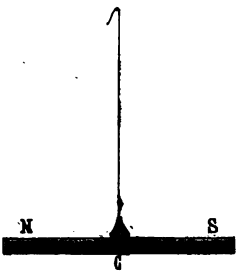


Fig. 105.

on soumet plusieurs fois de suite le même barreau à cette épreuve, on remarque qu'il prend toujours la même position, et que toujours la même extrémité se tourne vers le nord. Plusieurs barreaux suspendus de la même manière, et à une certaine distance les uns des autres, se placent dans des directions parallèles.

On appelle *méridien magnétique* le plan vertical qui passe par l'axe d'un barreau librement suspendu, lorsqu'il est arrêté dans sa position d'équilibre. Le méridien magnétique ne coïncide pas avec le méridien terrestre; l'angle compris entre ces deux plans dans une station déterminée prend le nom de *déclinaison*. La *déclinaison* est dite *occidentale* ou *orientale* suivant que la moitié du barreau tournée vers le nord est placée à l'*occident* ou

à l'*orient* du méridien terrestre. La *déclinaison* change de valeur et même de signe suivant les lieux d'observation ; elle éprouve en outre des variations continuelles dans un même point de la surface du globe. Actuellement, à Paris, la *déclinaison* est *occidentale* et s'élève à 20° 17′.

L'extrémité de l'aimant qui se tourne vers le nord prend le nom de *pôle nord ;* on appelle *pôle sud* son extrémité opposée.

Lorsque, des pôles d'un barreau librement suspendu à un fil sans torsion, on approche successivement les pôles d'un autre barreau, l'aimant mobile s'écarte du plan du méridien magnétique. Le sens dans lequel il se déplace dans chaque cas prouve que *les pôles de même nom se repoussent, tandis que les pôles de noms contraires s'attirent mutuellement.*

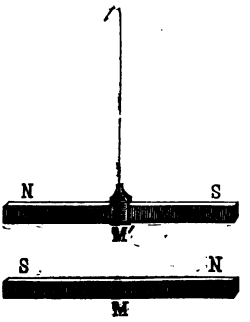


Fig. 106.

Au-dessous d'un barreau M′ suspendu à un fil sans torsion, plaçons (Fig. 106) un fort barreau M dans une orientation quelconque. Le premier tourne dans un plan horizontal, et, après quelques oscillations, se fixe dans une di-

rection telle que les axes des deux barreaux sont parallèles, et que les pôles de noms contraires sont placés du même côté d'un fil suspenseur et au-dessus l'un de l'autre. Cette expérience démontre que la terre agit sur un barreau mobile à la manière d'un aimant fixe. Le globe terrestre peut donc être considéré comme un vaste aimant dont les *pôles magnétiques* seraient placés, l'un dans son hémisphère austral, l'autre dans son hémisphère boréal. Les deux hémisphères de la terre sont ainsi assimilés aux deux moitiés d'un barreau aimanté, l'hémisphère *boréal* jouissant des propriétés *magnétiques* du *pôle sud*, et l'hémisphère *austral* exerçant la même action que le *pôle nord* d'un aimant naturel ou artificiel.

Dans les expériences précédentes, le barreau suspendu à un fil sans torsion peut être remplacé par une *aiguille aimantée* portée sur une pointe métallique au moyen d'une

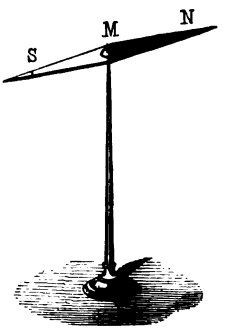


Fig. 107.

chape d'agate M placée en son centre de figure (Fig. 107). L'*aiguille* peut tourner librement dans un plan hori-

zontal. Quand on l'abandonne à elle-même, elle exécute des oscillations sous l'influence de l'action terrestre, puis finit par s'arrêter dans une position telle que la ligne des pôles, qui coïncide avec son axe de figure, est contenue dans le plan du *méridien magnétique* du lieu.

Action d'un barreau aimanté sur le fer doux. — Dans le voisinage d'un des pôles d'un barreau aimanté, plaçons (Fig. 108) un prisme allongé de fer doux qui ne

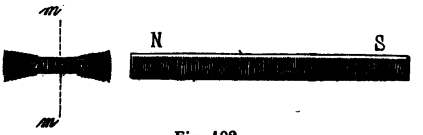


Fig. 108.

présente aucune trace d'aimantation. Sous l'influence du barreau, le prisme de fer doux acquiert la propriété d'attirer la limaille de fer; il devient lui-même un véritable aimant avec ses *deux pôles* et sa *ligne neutre*. Dans le fer doux aimanté par influence, les *pôles* sont disposés en sens inverse de ceux du barreau, et la *ligne neutre*, au lieu d'occuper la position médiane, est placée dans le voisinage de l'extrémité qui regarde le barreau. Cette aiman-

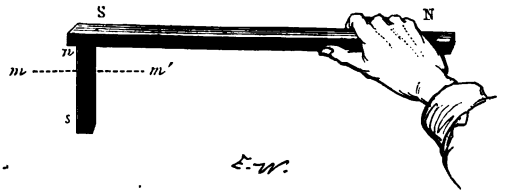


Fig. 109.

tation ou *polarisation* par influence n'est que *temporaire;* elle disparaît complétement du moment que le prisme de

fer doux et le barreau sont éloignés l'un de l'autre. Les phénomènes sont les mêmes, lorsqu'un prisme de fer doux (Fig. 109) reste suspendu par attraction à l'un des pôles d'un barreau aimanté.

Cette aimantation temporaire par influence des prismes de fer doux peut être mise en évidence d'une autre manière. Au pôle *nord* d'un fort barreau, on suspend (Fig. 110) un premier prisme de fer doux qui devient lui-même un aimant capable de supporter un deuxième

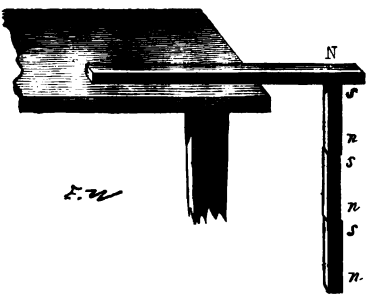


Fig. 110.

prisme. Ce deuxième prisme, à son tour, est aimanté par influence, peut en supporter un troisième, et ainsi de suite. Dans cette chaîne magnétique, les prismes aimantés par influence se touchent toujours par leurs pôles de noms contraires, et l'action s'affaiblit à mesure qu'on s'éloigne du barreau. Mais, si l'on détache le barreau du premier prisme de fer doux, toute trace de *polarisation* disparaît dans ces prismes qui se séparent immédiatement les uns des autres.

Nous avons vu qu'un prisme de fer doux, présenté au

pôle *nord* d'un barreau, devient lui-même, par influence, un véritable aimant. Les pôles de noms contraires en présence agissent l'un sur l'autre par attraction, et le fer doux reste suspendu contre l'action de la pesanteur. Les choses étant ainsi disposées, si (Fig. 111) l'on rapproche un second barreau par son pôle *sud*, toute adhérence

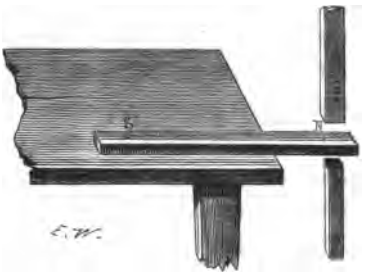


Fig. 111.

magnétique cesse, le prisme de fer doux se détache et tombe. Dans cette expérience, le second barreau tend à développer, dans le prisme de fer doux, une aimantation de la polarisation est contraire à celui déterminé par le premier barreau. Dès lors, le fer doux, soumis à deux influences contraires, reprend son état naturel, perd toute trace de *polarisation*, et doit nécessairement obéir à l'action de la pesanteur.

Pour compléter cette étude empirique des propriétés des barreaux aimantés, nous devons ajouter les deux faits suivants démontrés par l'expérience :

1° Quand on casse un barreau aimanté, chacun des fragments, quel que soit d'ailleurs leur nombre, forme un aimant complet avec ses *deux pôles* et sa *ligne neutre*.

2° L'aimantation développée, par influence, dans un morceau de fer doux est d'autant plus faible que la distance à laquelle agit le barreau est elle-même plus grande.

Des faits précédents, il résulte que l'action d'un pôle magnétique, sur une série de cylindres de fer doux soumis à son influence, ressemble beaucoup à l'*induction* exercée par une sphère électrisée sur une série de conducteurs isolés. Sous l'influence du pôle magnétique, les cylindres de fer doux se polarisent, et cette polarisation persiste tant que dure l'influence. De même, les extrémités des conducteurs isolés, placés dans le voisinage d'une sphère électrisée, se chargent d'électricités de noms contraires; cette polarisation persiste tant que l'induction de la sphère est maintenue, et disparaît complétement quand la sphère est éloignée ou déchargée. Cependant il existe une grande différence entre un barreau aimanté et une sphère électrisée. Le contact du fer doux, en effet, n'affaiblit nullement les propriétés magnétiques du barreau; l'agent magnétique, quelle que soit sa nature, ne peut pas, au contact apparent, passer du barreau au morceau de fer doux. Quand, au contraire, on touche une sphère électrisée avec un conducteur isolé, une partie de l'électricité de la sphère se répand sur le conducteur, et les propriétés électriques de la sphère sont affaiblies.

Action d'un barreau aimanté sur l'acier. — La limaille d'acier obéit à l'action des pôles magnétiques; elle est cependant moins fortement attirée que la limaille de fer doux. Quand on présente un cylindre d'acier au pôle d'un aimant, d'abord l'adhérence ne se prononce pas, et le

cylindre d'acier tombe dès qu'on l'abandonne à lui-même; mais, si l'on maintient le contact pendant quelques minutes, l'acier se polarise comme un morceau de fer doux et adhère fortement au barreau aimanté. Puis, quand on détache ce cylindre, et qu'on l'éloigne du barreau pour le soustraire à son influence, on constate que l'acier conserve son état polaire, et est devenu lui-même un *aimant permanent*. Au point de vue de l'influence exercée sur ces corps par un barreau aimanté, il existe donc deux différences importantes entre l'acier et le fer doux.

1° Au voisinage ou au contact d'un pôle magnétique, le fer doux s'aimante *instantanément;* l'acier s'aimante *lentement* et n'atteint que graduellement le maximum d'aimantation.

2° Le fer doux éloigné ou séparé du pôle magnétique perd *instantanément* son aimantation ; l'acier, au contraire, *conserve son aimantation et reste un aimant permanent*, quand on le soustrait à l'influence du barreau.

On appelle *force coercitive* cette résistance que l'acier oppose au développement de la polarisation magnétique. Le même nom de *force coercitive* sert aussi à désigner la résistance que l'acier oppose à la destruction de la polarisation magnétique, une fois qu'elle s'est développée en lui sous l'influence d'une cause quelconque. Par différents degrés de trempe ou de recuit, on peut, à volonté, modifier la *force coercitive* de l'acier. Plus la trempe est dure, plus la *force coercitive* de l'acier est considérable. Les barreaux les plus fortement trempés sont donc, à la fois, ceux dans lesquels la polarisation magnétique se développe le plus difficilement et le plus lentement, et ceux

qui peuvent acquérir et conserver d'une manière permanente l'aimantation la plus puissante.

On dit qu'un barreau d'acier est aimanté à *saturation*, quand ses pôles magnétiques ont atteint le *maximum* d'énergie compatible avec l'intensité de sa force coercitive.

HYPOTHÈSE DES DEUX FLUIDES MAGNÉTIQUES.

Les analogies des faits précédents et des phénomènes électriques sont assez nombreuses pour expliquer comment les physiciens ont été conduits à admettre l'existence de deux *fluides magnétiques* qui, comme les deux électricités, s'attirent mutuellement et repoussent leurs propres molécules. Chacun de ces fluides prend le nom de l'hémisphère terrestre dans lequel son action est prédominante ; l'un s'appelle le *fluide boréal*, et l'autre le *fluide austral*. On admet que tout corps *magnétique* contient des quantités égales des deux fluides uniformément répandus sur chacune de ses molécules. Dans cet état, les fluides ne révèlent leur présence par aucun phénomène extérieur parce que, en un point quelconque du corps, leurs actions se neutralisent mutuellement. Mais, du moment que les fluides sont séparés, les propriétés magnétiques apparaissent, et le corps devient un aimant. D'ailleurs, les fluides magnétiques ne peuvent ni se transporter d'un corps à un autre, ni passer d'une molécule à une molécule voisine d'un même corps. La séparation des deux fluides ne peut donc s'accomplir que dans l'étendue de chacune des molécules constituantes des corps.

Cela posé, dans un *aimant* comme dans un corps *magnétique à l'état naturel*, chaque molécule doit contenir des quantités égales de fluide boréal et de fluide austral ; mais, dans le corps *simplement magnétique*, les deux fluides existent à la fois et en quantités égales sur tous les points de chaque molécule, tandis que, dans l'aimant, des charges égales de fluides de noms contraires séparés sont localisées sur les extrémités opposées de chaque molécule. Dans une série de molécules parallèle à la ligne des pôles d'un barreau, les deux fluides affectent une distribution analogue à celle qui est représentée dans la figure 112, et chaque particule du corps est elle-même un

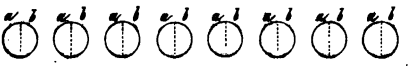


Fig. 112.

véritable aimant avec sa *ligne neutre* et ses *deux pôles*. M. le professeur Lamé (1) a développé, sur ce sujet, des considérations élémentaires qui donnent une idée, à la fois très simple et très exacte, du mode de distribution des deux fluides dans un barreau aimanté.

Fig. 113.

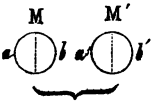


Fig. 114.

Dans une molécule d'acier M aimantée à saturation (Fig. 113), les quantités *a* et *b* de fluides libres sont réglées

(1) *Cours de physique*, 2e édit., 1840, t. III, p. 138.

par cette circonstance que leur attraction mutuelle est équilibrée par la *force coercitive* qui les tient séparées.

Deux molécules voisines M, M′ (Fig. 114) s'influencent mutuellement, de manière à augmenter la dose des fluides libres accumulés sur chacune d'elles. En effet, la répulsion réciproque de *a* et de *a′* facilite la réunion des deux fluides libres en M′ et la contrarie en M; à son tour, la répulsion réciproque de *b* et de *b′* facilite la réunion des deux fluides en M et la contrarie en M′. Comme, d'ailleurs, les quantités des fluides *austral* et *boréal* séparés sur les deux molécules sont égales, ces deux ordres d'actions répulsives, s'exerçant à des distances égales, se neutralisent et restent sans influence sur l'aimantation finale de M et de M′. Il n'en est pas de même des attractions entre les fluides de *noms contraires; b* et *a′* s'attirent mutuellement et leur action réciproque s'ajoute à celle de la *force coercitive* pour maintenir les fluides séparés en M et en M′. Il est vrai que *a* et *b′* s'attirent aussi, et que cette attraction favorise la réunion des deux fluides en M et en M′; mais l'action réciproque de *b* et de *a′* l'emporte sur celle de *a* et de *b′*, parce qu'elle s'exerce à plus faible distance. En somme donc, la résultante des influences réciproques des deux fluides libres répandus sur deux molécules voisines tend à rendre leur aimantation plus énergique. Cette influence est, d'ailleurs, d'autant plus prononcée que les molécules sont elles-mêmes plus rapprochées l'une de l'autre.

Il résulte nécessairement de là que, dans la série linéaire de la figure 112, chaque molécule est influencée par toutes les autres de manière à acquérir une charge de fluides

libres supérieure à celle que la *force coercitive* seule peut tenir en équilibre. Bien que toutes ces influences soient concordantes, comme leur intensité varie en sens inverse de la distance à laquelle elles s'exercent, le degré de l'aimantation définitive d'une molécule quelconque doit dépendre du rang qu'elle occupe dans la série.

En effet, formons (Fig. 115) une série de *sept* molécules d'acier équidistantes, de même force coercitive et égale-

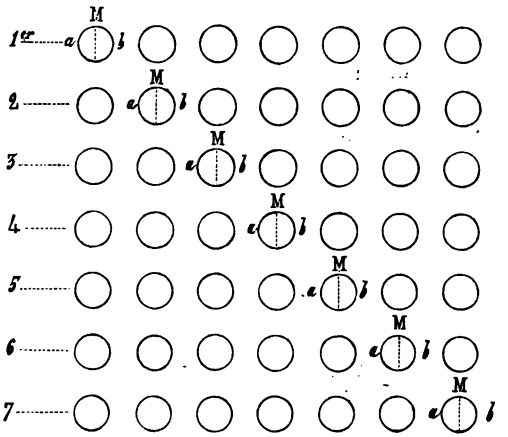


Fig. 115.

ment aimantées. Une molécule quelconque M peut être successivement placée dans les *sept* positions représentées dans la figure. Dans chacune de ces positions, elle subit l'influence des *six* autres molécules. Mais, évidemment, la *somme* des distances de cette molécule M à chacune des *six* autres qui l'influencent *diminue* depuis la *première* jusqu'à la *quatrième* position. Dans les *trois dernières*

positions, cette *somme augmente* graduellement, et, par raison de symétrie, repasse par les mêmes valeurs qu'elle avait dans les *trois premières*. Par conséquent, la *somme* des influences que subit la molécule M, et le *degré final* d'aimantation qu'elle acquiert augmentent graduellement depuis la *première* jusqu'à la *quatrième* position, puis varient *symétriquement* en sens inverse depuis cette *quatrième* position jusqu'à la *septième*. Finalement, et en ce qui concerne les quantités de fluide *austral* et de fluide *boréal* retenus *libres* et *séparés* à la surface de la molécule M, la *cinquième* position correspond exactement à la *troisième*, la *sixième* à la *seconde*, et la *septième* à la *première*.

Ainsi, dans une série linéaire (Fig. 116) de molécules aimantées s'influençant mutuellement, lorsque l'équilibre est établi, chacune d'elles contient, à l'état de liberté, autant de fluide boréal que de fluide austral ; une molécule pos-

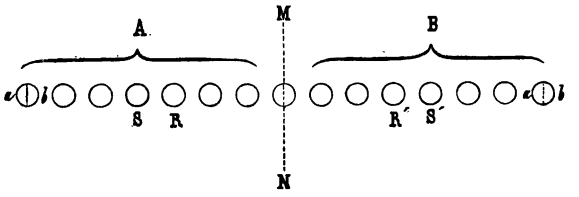


Fig. 116.

sède une charge d'autant plus forte qu'elle est elle-même située plus loin des extrémités et plus près de la ligne médiane MN ; enfin, deux molécules symétriquement placées à droite et à gauche de la ligne MN sont au même degré d'aimantation. Cela posé, dans la moitié A de la série linéaire, prenons deux molécules successives quel-

conques R et S; sur les faces par lesquelles ces molécules se regardent, elles contiennent, la première du *fluide austral* et la seconde du *fluide boréal* à l'état libre, de plus le *fluide austral* de R l'emporte nécessairement en quantité sur le *fluide boréal* de S. Si nous prenons maintenant deux molécules successives R′, S′ dans la moitié B de la série, nous voyons, au contraire, que le *fluide boréal* de R′ l'emporte sur le *fluide austral* de S′. En comparant ainsi deux à deux les molécules de la série, nous trouvons que le fluide austral domine en quantité dans la moitié A, tandis que le *fluide boréal* est prédominant dans la moitié B. Il en résulte que l'action de la partie A de la série sur un point extérieur est celle du *fluide austral*, ou de l'*hémisphère austral* de l'aimant terrestre, et que la partie B agit comme le *fluide boréal*, ou comme l'*hémisphère boréal* de la terre. Un barreau aimanté n'étant que la réunion d'un certain nombre de séries parallèles de molécules aimantées, ses propriétés se déduisent directement de ce mode de distribution des deux fluides libres.

Nous verrons plus loin que les *pôles* d'un barreau aimanté sont placés dans son intérieur et à une certaine distance de ses extrémités. Il devait en être ainsi, car *chacun de ces centres d'action* ne doit être considéré que comme le *point d'application de la résultante* de toutes les actions concordantes de la moitié correspondante du barreau.

La polarité d'un aimant résultant de la distribution inégale des fluides libres entre ses diverses molécules, et cette distribution dépendant elle-même des actions réciproques de ses molécules, chacun des fragments d'un barreau

brisé doit devenir le siége d'influences magnétiques intérieures qui lui créent *deux pôles* séparés par une ligne *neutre*, et le transforment, ainsi que l'expérience le prouve, en un nouvel *aimant*.

De ce que l'expérience nous a appris (p. 226) relativement à l'action de la terre sur un barreau aimanté et à l'influence réciproque de deux aimants, il résulte que l'extrémité d'un barreau mobile qui se tourne vers le *nord* doit être chargée de *fluide austral*, et que le *fluide boréal* doit prédominer dans l'extrémité qui regarde le *sud*. Au lieu de conserver aux pôles des aimants des noms qui rappellent tout simplement leur mode d'orientation sous l'influence de la terre, on a préféré leur imposer des dénominations qui indiquent la nature des fluides libres auxquels ils sont supposés devoir leurs propriétés. On appelle donc *pôle austral* le pôle d'un barreau qui se tourne vers le *nord*, et *pôle boréal* celui qui regarde le *sud*.

ACTION DU GLOBE TERRESTRE.

L'action du globe est purement directrice. — Lorsqu'on suspend un barreau aimanté par son centre de gravité à un fil sans torsion, il se place dans le plan du méridien magnétique, et le fil suspenseur conserve la direction verticale. Un barreau aimanté, porté sur l'eau au moyen d'un flotteur de liége, tourne sur son centre de gravité jusqu'à ce qu'il soit dans le méridien magnétique; mais, une fois qu'il a atteint cette position, il n'éprouve aucun mouvement de glissement à la surface du liquide. En second lieu, l'expérience démontre que, quel que soit le

degré d'aimantation qu'on lui communique, un barreau d'acier trempé conserve, après l'opération, le même poids qu'il avait avant.

La force en vertu de laquelle le globe agit sur un barreau aimanté n'a donc ni composante verticale, ni composante horizontale, et, par conséquent, elle ne peut communiquer à son centre de gravité aucun mouvement de translation dans l'espace ; c'est une force *directrice* dont l'action se borne à faire tourner l'aimant sur son centre de gravité, de manière à le ramener dans une position déterminée d'équilibre stable.

La terre agit comme un vaste aimant dont les pôles magnétiques sont situés dans la profondeur du globe, l'un dans

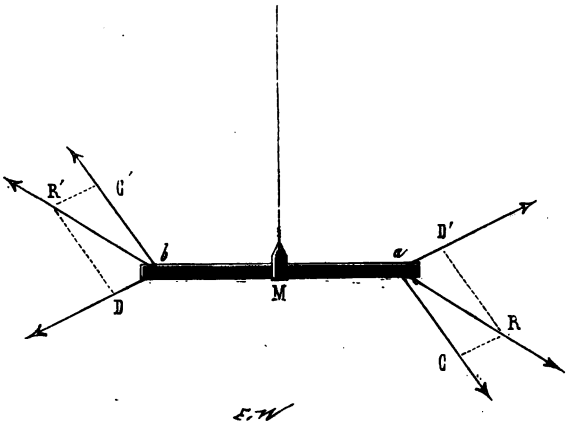


Fig. 117.

son hémisphère boréal, l'autre dans son hémisphère austral. Soit M (Fig. 117) un barreau aimanté posé horizontalement sur une chappe de papier ou de cuivre sus-

pendue à un fil sans torsion. Le pôle *boréal* de la terre attire suivant *a*C le pôle *austral* du barreau, et repousse suivant *b*C′ son pôle *boréal*; en même temps, le pôle *austral* de la terre agit sur les deux pôles du barreau de manière à attirer le *boréal* suivant *b*D, et à repousser l'*austral* suivant *a*D′. A cause des faibles dimensions du barreau et de la distance très grande qui le sépare des pôles terrestres, l'attraction *a*C et la répulsion *b*C′ sont deux forces égales et parallèles ; l'attraction *b*D est aussi égale et parallèle à la répulsion *a*D′. Mais, généralement, les actions *b*D et *a*D′ du pôle *austral* de la terre ne sont pas égales aux actions *a*C et *b*C′ de son pôle *boréal*. Ces deux systèmes de forces, agissant l'un en *a*, l'autre en *b*, peuvent être remplacés par leurs résultantes *a*R, *b*R′, qui sont nécessairement égales et parallèles. En définitive, l'influence du globe terrestre sur un barreau aimanté se réduit à l'action d'un *couple* de deux forces égales, parallèles et opposées, de direction généralement inclinée sur l'horizon, et dont le point d'application est situé sur son axe et très près de ses extrémités.

Ainsi sollicité, le barreau tourne autour de son centre de gravité *immobile* dans l'espace, et se fixe dans le plan du méridien magnétique.

A cause de son mode de suspension, le barreau de la figure 117 conserve toujours sa position horizontale. Mais il n'en serait pas ainsi d'un barreau qui, au lieu d'être porté sur une chape, serait librement suspendu par son centre de gravité; ses pôles se placeraient l'un au-dessus, l'autre au-dessous du plan horizontal passant par son centre de gravité, et son axe prendrait, dans le méri-

dien magnétique, une direction parallèle à celle des deux forces aR, bR′. Dans l'hémisphère boréal du globe, c'est le pôle *austral* du barreau qui plonge vers la terre ; dans l'hémisphère austral, c'est au contraire le pôle *boréal* du barreau qui s'abaisse au-dessous de l'horizon. On appelle *inclinaison* l'angle compris entre le plan horizontal passant par le centre de gravité du barreau et la portion de son axe située au-dessous de ce plan. A Paris, l'*inclinaison* de l'aiguille aimantée est actuellement de 66° 28′.

En général, l'inclinaison augmente avec la latitude du lieu de l'observation. On donne le nom d'*équateur magnétique* à la ligne qui passe par les points de la surface du globe où le barreau aimanté, librement suspendu par son centre de gravité, conserve une position horizontale. Dans ces points, les composantes du couple magnétique terrestre sont nécessairement horizontales aussi. Cette ligne, correspondant aux points géographiques où l'inclinaison est nulle, ne coïncide pas avec l'équateur terrestre ; elle est très sinueuse, et représente très imparfaitement un grand cercle. D'après les déterminations de M. Duperrey, l'équateur magnétique coupe en deux points l'équateur terrestre. Le premier de ces *nœuds*, ou points d'intersection, est situé près de l'île San-Tomé par 3° 20′ de longitude orientale. A partir de ce point qui représente son *nœud atlantique*, l'équateur magnétique, situé tout entier dans l'hémisphère austral, s'éloigne de l'équateur terrestre, et atteint son maximum d'*excursion australe* par 15° 40′ de latitude, entre Rixas et Cuaybas, sur le continent américain ; puis l'équateur magnétique se rapproche gra-

duellement de l'équateur terrestre, et reste confondu avec lui dans les 17° 51′ qui sont compris entre 175° 44′ de longitude orientale et 166° 25′ de longitude occidentale. Le second *nœud*, ou *nœud polynésien*, serait donc situé au milieu de cet intervalle, c'est-à-dire par 175° 20′ de longitude occidentale. Entre ce second nœud et le premier, l'équateur magnétique, tout entier situé dans l'hémisphère boréal, atteint son maximum d'*excursion boréale* par 11° 40′ de latitude, aux environs de l'île Socotora.

La figure 107 de la page 228 représente une aiguille aimantée, portée sur une pointe métallique au moyen d'une chape d'agate M placée en son centre de figure. Dans notre hémisphère boréal, une aiguille semblable tend nécessairement à s'incliner sur l'horizon, son pôle *nord* ou *austral* plongeant vers la terre. Pour la maintenir dans une position horizontale, on contre-balance l'action du couple terrestre en travaillant l'aiguille de manière que la moitié correspondante à son pôle *sud* ou *boréal* conserve un excès de poids.

Détermination de la position du couple terrestre dans l'espace. — Le couple terrestre est situé dans le méridien magnétique, et sa direction est généralement inclinée sur l'horizon. Les instruments destinés à déterminer sa position dans l'espace sont, d'une part, la *boussole de déclinaison*, et, d'autre part, la *boussole d'inclinaison*.

Boussole de déclinaison. — La boussole de déclinaison (Fig. 118) se compose de trois pièces principales : un cercle gradué horizontal CC′, appelé *cercle azimutal;* une boîte circulaire à boussole de cuivre rouge B, fermée à sa

partie supérieure par une plaque de verre, et mobile autour de son centre dans un plan horizontal; une lunette L mobile dans un plan vertical. L'appareil est supporté par une colonne H de cuivre rouge appuyée sur trois pieds munis de vis calantes; le niveau à bulle d'air N sert à ra-

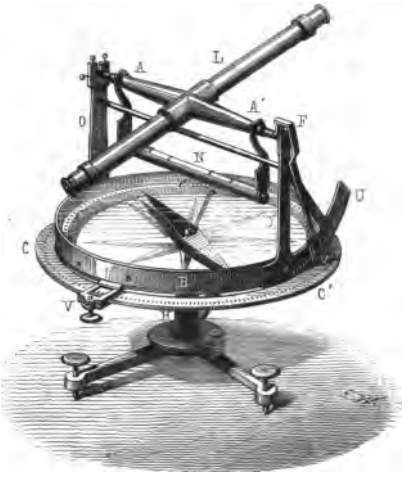


Fig. 118.

mener le cercle azimutal, le fond de boîte à boussole et l'axe de rotation de la lunette dans une position horizontale. D'ailleurs, l'axe vertical de la colonne H passe, à la fois, par le centre du cercle azimutal, par le centre de la boîte à boussole et par le centre de rotation de la lunette.

A la boîte à boussole B sont fixés deux montants verticaux de cuivre rouge O, O', qui supportent l'axe de rotation AA' de la lunette; par ce moyen, l'axe de rotation

de la lunette suit tous les mouvements de la boîte B, et ne peut se déplacer qu'avec elle. Sur le fond de la boîte, existe un cercle divisé *ee'*, qui correspond aux extrémités de l'aiguille aimantée. La boîte est complétement indépendante du cercle azimutal ; quand elle tourne horizontalement autour de son centre, elle entraîne le vernier V qui sert à mesurer l'angle d'écartement.

Le plan vertical dans lequel se meut l'axe de la lunette passe par le *zéro* de la graduation du cercle divisé *ee'* du fond de la boîte B. L'axe de rotation AA' porte, à son extrémité, un vernier FV' qui sert à indiquer, sur l'arc de cercle gradué U, l'angle du rayon visuel avec l'horizon.

Pour déterminer la déclinaison magnétique dans un lieu donné, on commence par rendre horizontal le plan du cercle *azimutal* CC'. Puis, on fait tourner la boîte B sur son centre jusqu'à ce qu'un astre connu se trouve sur l'axe optique de la lunette ; le plan vertical de l'axe de la lunette coïncide alors avec le *vertical* de l'astre. On fait de nouveau tourner la boîte sur son centre jusqu'à ce que le vernier V ait décrit, sur le cercle azimutal, un arc qui mesure l'angle du *vertical* de l'astre avec le méridien terrestre du lieu. Dans cette position, l'axe de la lunette et le *zéro* de la graduation du cercle divisé *ee'*, sont dans le plan du méridien terrestre. La position de l'aiguille, et son angle d'écartement compté sur le cercle *ee'*, indiquent donc le sens et la valeur de la déclinaison magnétique du lieu.

Dans un point déterminé de la surface du globe, la déclinaison magnétique ne conserve pas toujours la même

valeur; le tableau suivant indique les variations qu'elle a éprouvées à Paris depuis 1580.

Déclinaisons observées à Paris.

Années.	Déclinaisons.			Années.	Déclinaisons.		
1580.....	11°	30′	Est.	1816.....	22°	25′	Ouest.
1618.....	8			1817.....	22	19	
1663.....	0			1823.....	22	23	
1678.....	1	30	Ouest.	1825.....	22	22	
1700.....	8	10		1828.....	22	5	
1780.....	19	55		1829.....	22	12	
1785.....	22			1832.....	22	3	
1805.....	22	5		1835.....	22	4	
1813.....	22	28		1851.....	20	25	
1814.	22	34		1853 (3 décemb.)	20	17	

D'après ce tableau, en 1580, la déclinaison à Paris était *orientale;* puis, le pôle austral de l'aiguille aimantée s'est peu à peu rapproché du méridien terrestre, et la déclinaison a diminué graduellement jusqu'en 1663, époque où elle était nulle; le méridien magnétique coïncidait alors avec le méridien terrestre. A partir de 1663, le pôle austral de l'aiguille aimantée a continué à marcher à l'*ouest;* la déclinaison est devenue *occidentale* et a augmenté jusqu'en 1814, époque où elle a atteint son *maximum*. Depuis 1814 jusqu'à nos jours, le plan du méridien magnétique obéit à un mouvement rétrograde qui le rapproche graduellement du méridien terrestre.

Indépendamment des variations précédentes, la déclinaison éprouve des changements diurnes qui se reproduisent avec une grande régularité. En Europe, le pôle austral de l'aiguille de déclinaison conserve une position fixe depuis 9 à 10 heures du soir jusqu'au lever du soleil. Au moment où le soleil s'élève au-dessus de l'hori-

zon, le pôle austral se déplace vers l'ouest, et marche dans cette direction jusque vers une heure ou deux de l'après-midi ; puis il rétrograde et se rapproche de son point de départ jusqu'à 9 ou 10 heures du soir, heure à laquelle l'aiguille reprend son immobilité jusqu'au lendemain matin. La *variation diurne* est plus grande en été qu'en hiver. L'amplitude moyenne de l'écart est de 13′ à 15′ entre l'équinoxe de printemps et l'équinoxe d'automne; elle n'est que de 8′ à 10′ entre l'équinoxe d'automne et l'équinoxe de printemps. Dans les régions les plus septentrionales du globe, les variations diurnes sont en général moins régulières et plus considérables.

Indépendamment de ces mouvements réguliers, l'aiguille de déclinaison éprouve, sous l'influence de causes très diverses, de véritables *perturbations*. Les plus importantes de ces causes perturbatrices sont les éruptions volcaniques, les tremblements de terre, et surtout les aurores boréales, dont les apparitions sont signalées par l'agitation subite des boussoles de déclinaison placées dans des régions très éloignées des lieux où le météore est visible.

Boussole d'inclinaison. — Cet appareil (Fig. 119) est destiné à déterminer la direction du couple terrestre dans le plan du méridien magnétique du lieu. Sur les côtés de l'aiguille, et perpendiculairement à son axe de figure, est fixé un axe de cuivre terminé par deux cylindres d'acier poli appuyés par leurs extrémités sur deux couteaux d'agate très tranchants, portés eux-mêmes sur deux traverses métalliques horizontales t, t'. L'axe de ces cylindres d'acier, ou *tourillons*, est l'axe de rotation de l'aiguille.

Le centre de gravité de l'aiguille se trouve sur l'axe mathématique des cylindres d'acier qui lui servent de support, et coïncide avec le centre du limbe circulaire vertical *ll'*. Ce limbe est solidement fixé à une plaque métallique horizontale P P' qui porte un niveau à bulle d'air *n*,

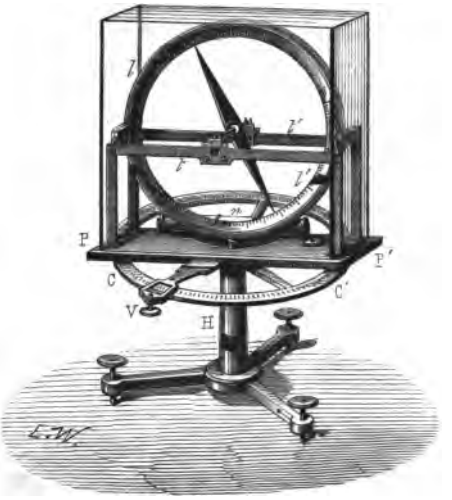


Fig. 119.

et, à l'aide de montants métalliques verticaux, fait corps avec les traverses horizontales *t*, *t'*. Le tout est monté sur un pied métallique muni de trois vis calantes; un limbe horizontal CC' est fixé, par des rayons métalliques, au pied de l'instrument. La plaque PP', les traverses horizontales *t*, *t'*, et le limbe vertical *ll'*, sont mobiles autour de l'axe vertical de la colonne H. Cet axe passe, à la fois, par le centre du limbe horizontal CC', par le centre du limbe

vertical ll', et par le centre de gravité de l'aiguille. Le vernier V, fixé à angle droit sur la plaque PP', glisse sur le limbe horizontal CC'; il indique le déplacement angulaire du plan du limbe vertical ll', et, par conséquent, de l'axe de rotation de l'aiguille. Le *zéro* de la graduation du limbe vertical ll' correspond, d'ailleurs, à l'extrémité du diamètre horizontal de ce limbe qui est tournée vers le nord.

Pour déterminer, avec cet instrument, la direction du couple terrestre, il suffit de faire tourner le limbe vertical ll' jusqu'à ce que son plan coïncide avec celui du méridien magnétique du lieu. L'aiguille, que son mode de suspension laisse libre de se mouvoir dans le plan du limbe vertical ll', obéit à l'action du globe, tourne sur son centre de gravité, et, après quelques oscillations, se fixe dans une position telle que son axe de figure indique la direction des composantes du couple terrestre. La division du limbe gradué ll', à laquelle correspond l'extrémité *australe* de l'aiguille, indique l'angle que fait la direction du couple terrestre avec l'horizontale du lieu. Cet angle est ce qu'on appelle l'*inclinaison*.

Orientons l'appareil de manière que l'axe des tourillons soit dans le plan du méridien magnétique, et donnons à l'aiguille une position verticale, son pôle *austral* tourné vers la terre; l'aiguille sera en *équilibre stable* dans cette direction. En effet, l'axe de figure de l'aiguille et l'axe des tourillons sont tous les deux dans le plan du couple terrestre. La composante de ce couple appliquée au pôle *austral* de l'aiguille se décompose en deux forces : l'une, *horizontale*, est dirigée du *sud au nord*, et l'autre, *verticale*, agit de *haut en bas*. La composante de ce couple

appliquée au pôle *boréal* de l'aiguille se décompose également en deux forces, dont l'une, *horizontale*, est dirigée du *nord au sud*, et l'autre, *verticale*, agit de *bas en haut*. De ces quatre forces, deux sont *horizontales*, égales, de sens contraires et *parallèles à l'axe des tourillons;* leur action est nécessairement *détruite* par le mode de suspension. Les deux forces *verticales* sont aussi égales et de sens contraires; mais elles ne peuvent communiquer aucun mouvement à l'aiguille, parce que leur direction coïncide avec son axe vertical. Lorsque l'axe des tourillons est dans le plan du méridien magnétique, l'aiguille est donc en *équilibre stable*, si elle est *verticale* et si son pôle *austral* est tourné vers la terre. Réciproquement, si l'orientation de l'appareil est telle que l'aiguille s'arrête dans une position *verticale*, son pôle *austral* tourné vers la terre, nous sommes en droit d'affirmer que l'axe des tourillons est dans le plan du méridien magnétique.

Il est maintenant facile de comprendre comment la boussole d'inclinaison fournit un moyen très simple de déterminer la position du méridien magnétique, quand cette position n'est pas connue. En effet, faisons tourner le limbe *ll'* autour de son axe vertical jusqu'à ce que l'aiguille prenne une position verticale; nécessairement, alors, l'axe de ses tourillons sera dans le plan du méridien magnétique, et par conséquent le limbe *ll'* sera lui-même perpendiculaire à ce plan. Il suffira donc de faire exécuter au limbe *ll'* un quart de révolution, pour le ramener dans le plan du méridien magnétique du lieu, c'est-à-dire dans une position telle que l'aiguille indique directement l'*inclinaison* du couple terrestre.

Dans l'hémisphère boréal de la terre, le pôle austral d'une aiguille librement suspendue par son centre de gravité s'abaisse au-dessous de l'horizon, mais l'*inclinasion*, dans un même lieu, est loin d'être fixe, elle éprouve des variations importantes à connaître. Le tableau suivant indique les valeurs de l'*angle d'inclinaison* successivement observées à Paris depuis l'année 1671 jusqu'à nos jours.

Inclinaisons observées à Paris.

1671	75°		1820	68°	20′
1754	72	15′	1821	68	14
1776	72	25	1822	68	11
1780	71	48	1823	68	8
1791	70	52	1825	68	
1798	69	51	1826	68	
1806	69	12	1829	67	41
1810	68	50	1831	67	40
1814	68	36	1835	67	24
1816	68	40	1851 (novembre)	66	35
1818	68	35	1853 (décembre)	66	28
1819	68	25			

Ainsi, en négligeant de légères irrégularités, on peut dire que, depuis 1671 jusqu'à nos jours, l'inclinaison de l'aiguille aimantée, à Paris, a éprouvé une diminution continuelle.

Indépendamment de ces variations annuelles et séculaires, l'aiguille d'inclinaison éprouve des oscillations quotidiennes semblables à celles de l'aiguille de déclinaison, mais dont l'amplitude est moindre. Il résulte des observations de M. Hansteen que l'inclinaison est de 4′ à 5′ plus grande dans la matinée que dans l'après-midi, et qu'en été, la moyenne de l'angle d'inclinaison l'emporte d'environ 15′ sur la moyenne de l'hiver.

Intensité du couple terrestre. — Les indications fournies par les boussoles d'inclinaison et de déclinaison sont toujours suffisantes pour déterminer exactement la direction du couple terrestre dans l'espace ; il nous reste à montrer comment l'action du globe sur un barreau aimanté peut servir à mesurer l'*intensité* de ce couple terrestre, ou du moins à déterminer les rapports suivant lesquels elle varie d'un lieu à un autre.

Sur une chape de papier ou de cuivre suspendue à un fil sans torsion, plaçons (Fig. 120) un barreau aimanté *ab*, de manière que son centre de gravité se trouve sur

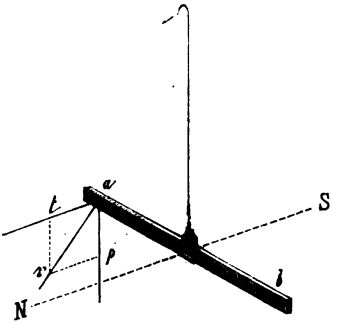


Fig. 120.

le prolongement du fil suspenseur. Ce barreau peut se mouvoir, autour de son centre de gravité, dans un plan horizontal. Soit NS l'intersection de ce plan horizontal avec le plan du méridien magnétique du lieu. Si le barreau est écarté de la position d'équilibre NS, chacun de ses pôles est attiré par une des composantes du couple terrestre qui tend à ramener son axe dans le plan du

méridien magnétique. Sous l'influence de ces deux actions concordantes, chacune des moitiés du barreau exécute des oscillations à droite et à gauche de la ligne NS, et se conduit comme un pendule dont le point fixe est le centre de gravité du barreau, et dont la longueur est égale à la distance de ce centre de gravité au pôle correspondant.

Soit *ar* la force qui agit sur le pôle austral; sa direction est, évidemment et dans toutes les positions du barreau, peut parallèle au plan du méridien magnétique. Cette force être décomposée en deux : l'une, *ap*, verticale, et l'autre, *at*, horizontale et parallèle à NS. La composante verticale *ap* est évidemment détruite par le mode de suspension ; la composante horizontale *at* est donc seule efficace pour faire tourner le barreau sur son centre de gravité et le ramener dans la position NS. Or, d'après les lois de la décomposition des forces, nous avons :

$$at = ar \,.\, \cos tar.$$

Mais l'angle *tar* est l'angle d'inclinaison du lieu où l'on fait l'observation. Si donc nous appelons i l'angle d'inclinaison *tar*, et m l'intensité *ar* du couple terrestre, variables l'un et l'autre avec le lieu de l'observation, la composante horizontale *at*, qui tend à ramener le barreau dans le plan du méridien magnétique, sera :

$$at = m \,.\, \cos i.$$

Dans une station déterminée, m et i étant constants, *at* est une force constante dans son intensité et dans sa direction, et le mouvement oscillatoire du barreau autour de la ligne NS s'accomplit suivant les lois des oscillations pendulaires.

Cela posé, faisons osciller un *même* barreau, dont l'aimantation reste constante, dans deux stations choisies à la surface du globe, et comptons les nombres des oscillations qu'il exécute dans un temps donné. Soient :

Pour la première station, m l'intensité du couple terrestre, i l'angle d'inclinaison, et n le nombre des oscillations exécutées dans un *temps donné*.

Pour la seconde station, m' l'intensité du couple terrestre, i' l'angle d'inclinaison, et n' le nombre des oscillations exécutées dans le *même temps*.

D'après les lois connues des oscillations pendulaires, nous aurons entre ces quatre quantités les relations suivantes :

$$\frac{m \cos i}{m' \cos i'} = \frac{n^2}{n'^2};$$

d'où :

$$\frac{m}{m'} = \frac{n^2 \cos i'}{n'^2 \cos i}.$$

Les angles d'inclinaison et les nombres d'oscillations étant directement déterminés, cette relation fournit le rapport des intensités du couple terrestre dans les deux stations choisies.

Comme l'échauffement d'un barreau diminue sa force magnétique, les observations, pour rester comparables, doivent être faites à la même température. Quand cette condition n'est pas remplie, il est nécessaire de corriger les résultats. On doit à M. Kupffer des règles et des tables qui permettent d'effectuer ces corrections.

LOIS DES ACTIONS MAGNÉTIQUES.

Coulomb a fait une très belle étude des lois des actions magnétiques ; les résultats de ses travaux ont été publiés dans la collection des *Mémoires de l'Académie des sciences et de l'Institut* (1). Dans ses recherches, il a successivement employé la méthode des oscillations, et une balance de torsion semblable à celle que nous avons précédemment décrite à propos des lois des attractions et des répulsions électriques.

Force directrice de la terre. — Nous avons vu plus haut (Fig. 120) que l'action du couple terrestre sur chacun des pôles d'un barreau aimanté, suspendu horizontalement dans une orientation quelconque, est la résultante de deux forces. De ces forces, l'une, *verticale*, *ap*, est détruite par le mode de suspension, et l'autre, *horizontale*, *at*, est parallèle au méridien magnétique et tend à ramener le barreau dans ce plan. En général, cette force *at* fait un angle aigu avec l'axe du barreau ; elle peut elle-même être décomposée en deux autres forces : l'une dirigée suivant l'axe du barreau, et l'autre perpendiculaire à cet axe. La première composante est équilibrée par une force égale, de même direction et de sens contraire, appliquée à l'autre pôle. La seconde composante, seule efficace pour faire tourner le barreau horizontalement autour de son centre de gra-

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. IX des *Savants étrangers*. — *Mémoires de l'Académie des sciences*, années 1784, 1785, 1789. — *Mémoires de l'Institut*, tomes IV et VI.

vité, tend à le ramener dans le plan du méridien magnétique : c'est la *force directrice du globe* dans le lieu où l'observation est faite. Les lois de la décomposition des forces indiquent que cette *force directrice* horizontale et perpendiculaire à l'axe du barreau, variable avec l'écartement du barreau par rapport au méridien magnétique, est proportionnelle au sinus de cet angle d'écartement. Coulomb, dans ses belles recherches sur les lois des actions magnétiques, a vérifié expérimentalement l'exactitude de cette loi au moyen de la *balance magnétique*.

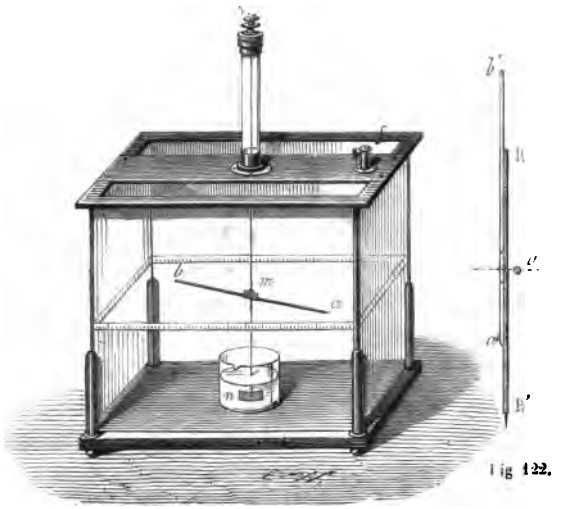


Fig. 121.

Dans la *balance magnétique* (Fig. 121), le fil métallique suspenseur porte, à son extrémité inférieure, une chape *m* de cuivre très mince, à laquelle est attaché un volant *n*

de même métal. Ce volant, plongé dans l'eau, sert à amortir les oscillations, et hâte le moment où l'aiguille prend sa position d'équilibre. Sur la chape, on place une aiguille. Quand l'aiguille est dans le plan du méridien magnétique, son axe doit être compris dans le plan vertical passant par le zéro de la graduation de la balance, et le fil suspenseur ne doit éprouver aucune torsion. Si, alors, on tourne le tambour supérieur de manière à tordre le fil suspenseur, l'aiguille est déviée de sa position primitive. Quel que soit le degré d'écartement de l'aiguille, quand elle est fixée dans une nouvelle position d'équilibre, la force de torsion du fil est égale et directement opposée à la force qui tend à la ramener dans le plan du méridien magnétique; elle sert donc de mesure à la *force directrice du globe*. On opère de manière à imprimer à l'aiguille des déviations finales successivement croissantes; on constate ainsi que les *torsions* du fil suspenseur correspondantes aux diverses positions d'équilibre de l'aiguille, et, par conséquent, les valeurs de la *force directrice du globe*, croissent dans le même rapport que les *sinus* des *angles d'écartement*. Ces observations nous conduisent aux deux conclusions suivantes :

1° Quand l'aiguille est perpendiculaire au plan du méridien magnétique, la *force directrice du globe* atteint son *maximum;* sa valeur est $m \cos i$ (page 254).

2° Quand l'aiguille est parallèle au plan du méridien magnétique, la *force directrice du globe* atteint son *minimum;* elle est *nulle*.

Lois de la distribution de l'intensité magnétique dans les aimants. — Dans la balance de torsion et dans

le plan du méridien magnétique, Coulomb avait fixé une règle de bois verticale et extrêmement mince RR′ (Fig. 122). L'aiguille horizontale mobile, quand le fil était sans torsion, venait appliquer son extrémité australe *a* contre cette règle sans la presser. Derrière la règle, en face du pôle de l'aiguille mobile, il plaçait un barreau vertical *a′b′* dans un sens convenable pour qu'il y eût répulsion. Ce barreau *a′ b′*, de très petit diamètre, était introduit par la douille *f* correspondante à l'extrémité supérieure de la règle de bois RR′. Il tordait ensuite le fil suspenseur jusqu'à ce que l'aiguille *ab* fût ramenée dans sa position primitive, où elle touchait la règle sans la presser. La torsion du fil mesurait évidemment l'action répulsive exercée par le barreau sur l'aiguille. Dans ces expériences, l'aiguille et le barreau n'étaient séparés que par l'épaisseur très faible de la règle et se coupaient à angle droit ; enfin les barreaux employés par Coulomb étaient des fils d'acier très minces et très longs (3 millimètres de diamètre sur 650 millimètres de longueur). Par conséquent, on peut admettre, avec Coulomb, que l'aiguille n'était influencée que par la section du barreau contenue dans son plan horizontal, et que la répulsion observée représentait l'intensité magnétique de cette section. En faisant glisser le barreau le long de la règle de manière à placer chacune de ses sections dans le plan horizontal de l'aiguille, et en déterminant, chaque fois, l'angle de torsion nécessaire pour ramener l'aiguille dans le plan du méridien, Coulomb mesurait l'*intensité magnétique* de diverses tranches du barreau perpendiculaires à son axe.

Coulomb a aussi appliqué la méthode des oscillations

à la recherche de la distribution de l'intensité magnétique dans un aimant. Pour cela, un barreau AB, de 4 millimètres de diamètre sur 730 millimètres de longueur, était disposé verticalement (Fig. 123). D'une section horizontale quelconque P, prise dans sa moitié australe, il rapprochait le pôle *boréal b* d'une aiguille suspendue à un fil sans torsion. L'aiguille, courte et massive, avait 14 millimètres de longueur et 7 millimètres de diamètre ; elle était d'ailleurs très rapprochée du barreau. Dans ces conditions, on peut admettre, sans erreur sensible, qu'elle n'était influencée que par la section du barreau contenue dans le plan horizontal passant par son axe. Cette aiguille, écartée du méridien magnétique, oscillait à la manière d'un pendule sous la double influence de l'action du globe et de l'attraction exercée par la tranche correspondante du barreau AB. Supposons qu'il s'agisse de comparer l'intensité de la tranche P avec celle de la tranche P′ ; il faut faire trois observations :

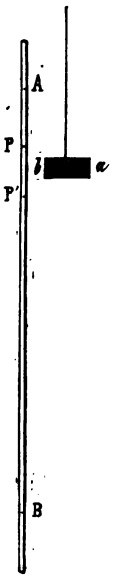


Fig. 123.

1° L'aiguille, oscillant sous l'influence de la terre *seule* dont l'action est désignée par g, exécute k oscillations dans un temps t.

2° L'aiguille, placée en face de la tranche P, exécute n oscillations dans le même temps t. Soit m la force *totale* agissant alors sur l'aiguille, l'*intensité magnétique* de la tranche P sera nécessairement $m - g$.

3° L'aiguille, placée en face de la tranche P′, exécute n' oscillations dans le même temps t. Soit m' la force *totale* agissant sur l'aiguille, l'*intensité magnétique* de la tranche P′ sera nécessairement $m' - g$.

D'après les lois des oscillations pendulaires, nous aurons :

$$m : g :: n^2 : k^2 \quad \text{et} \quad m' : g :: n'^2 : k^2,$$

d'où :

$$m - g : g :: n^2 - k^2 : k^2 \quad \text{et} \quad m' - g : g :: n'^2 - k^2 : k^2,$$

d'où, enfin :

$$\frac{m - g}{m' - g} = \frac{n^2 - k^2}{n'^2 - k^2}.$$

Cette dernière équation donne le rapport des forces $(m - g)$ et $(m' - g)$ qui représentent les *intensités magnétiques* des tranches P et P′ du barreau AB.

Pour représenter les résultats fournis par cette double

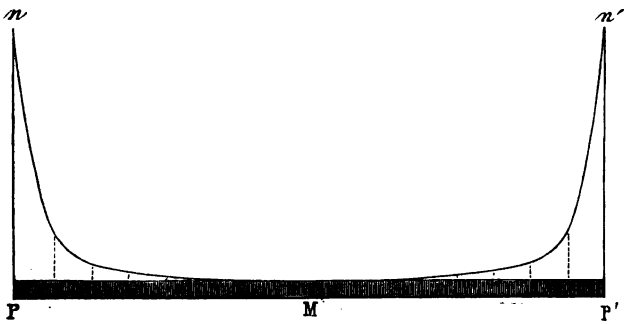


Fig. 124.

méthode, Coulomb élevait des perpendiculaires sur l'axe d'un aimant à droite et à gauche de son milieu M (Fig. 124),

et donnait à ces ordonnées des longueurs proportionnelles aux *intensités magnétiques* des tranches correspondantes; il appelait *courbe des intensités* la ligne menée par les extrémités de ces ordonnées. De ses recherches, on peut tirer les conclusions suivantes :

1° Pour un même aimant, la *courbe des intensités* est la même dans la moitié boréale et dans la moitié australe.

2° Aux environs de la partie médiane de l'aimant, la *courbe des intensités* se confond avec l'axe. Ce résultat indique que, dans une certaine étendue, à droite et à gauche de la région appelée *ligne neutre*, *l'intensité magnétique* est *nulle*, ou du moins assez faible pour ne pas produire d'effet *appréciable*.

3° Puis, à partir du lieu où elle se sépare de l'axe, la *courbe des intensités* s'élève rapidement jusqu'aux ordonnées P*n* et P'*n'* correspondantes aux extrémités de l'aimant. Les sections successives d'un barreau ont donc une *intensité magnétique* d'autant plus grande qu'elles sont elles-mêmes plus rapprochées de ses extrémités.

Si l'on détermine le centre de gravité de l'aire comprise entre l'axe du barreau, l'ordonnée P*n* élevée à une de ses extrémités et la *courbe des intensités*, le pied de la perpendiculaire abaissée de ce point sur l'axe de figure du barreau sera le *centre de l'action magnétique* ou le *pôle* de la moitié correspondante de l'aimant. Coulomb est ainsi parvenu à des résultats très importants relativement à la situation des *pôles* d'un aimant.

Dans les fils *minces* de *même diamètre*, et dont les longueurs *très différentes* sont toujours *supérieures* à 20 *centimètres*, les pôles sont situés à la même distance des

extrémités. Il en est de même des lames prismatiques de *dimensions transversales égales et très petites*, et dont les longueurs *dépassent* 20 *centimètres*. Dans tous ces cas, les pôles sont situés à 4 *centimètres* des extrémités. — Dans des aiguilles cylindriques de même longueur, les distances des pôles aux extrémités paraissent varier sensiblement dans le même rapport que leurs diamètres. — Dans les aimants très courts, les pôles sont situés à une distance des extrémités sensiblement égale au *sixième* de la longueur totale. — Dans les aiguilles taillées en losange, les pôles se rapprochent du centre de figure.

Moment magnétique d'une aiguille aimantée. — Coulomb donnait le nom de *moment magnétique* à la force nécessaire pour maintenir une aiguille en équilibre à une *distance angulaire donnée* du plan du méridien magnétique. Cette force est, évidemment, proportionnelle au produit de *la force directrice du globe* par *la force magnétique* de l'aiguille et par *la distance* de chacun des pôles de l'aiguille à son centre de suspension. Si donc on place successivement diverses aiguilles dans la balance de Coulomb (Fig. 121), les *torsions* du fil suspenseur nécessaires pour obtenir un *même écartement angulaire* de ces aiguilles seront la mesure de *leurs moments magnétiques*. D'ailleurs, dans une *position déterminée* à la surface du globe et pour une *déviation donnée*, la *force directrice* de l'aimant terrestre est *constante;* par conséquent, dans un même lieu d'observation, les *moments magnétiques* de diverses aiguilles, mesurés par les *torsions* du fil suspenseur nécessaires pour obtenir un même *écartement angulaire*, sont proportionnels aux *produits* des *forces magné-*

tiques de ces aiguilles par la *distance* de chaque pôle au centre de suspension. Coulomb a mesuré, par cette méthode, les *moments magnétiques* d'aiguilles très diverses aimantées à saturation ; ses résultats s'accordent très bien avec ce que nous avons dit plus haut de l'influence de la forme et des dimensions des aiguilles sur la distribution du magnétisme, et sur la position des pôles.

Quand les aiguilles soumises à l'expérience précédente sont de même longueur et de même diamètre, la *distance* de chaque pôle au centre de suspension est *la même*. Par conséquent, *leurs moments magnétiques* sont proportionnels à *leurs forces magnétiques*, et les *torsions* nécessaires pour les maintenir à *une même distance angulaire* du méridien magnétique peuvent servir de mesure à leurs *forces magnétiques*.

Pour comparer les *forces magnétiques* de deux aiguilles de *même longueur* et de *même diamètre*, on peut encore les faire osciller, dans le même lieu, sous l'influence de l'aimant terrestre. D'après les lois connues des mouvements pendulaires, les *forces magnétiques* de ces aiguilles sont dans le rapport des carrés des nombres des oscillations exécutées dans un temps donné.

Lois des attractions et des répulsions magnétiques. — Pour déterminer ces lois, Coulomb s'est servi de la balance magnétique (Fig. 121). La règle de bois RR′ étant enlevée, il plaçait, sur la chape du fil suspenseur, un fil d'acier aimanté horizontal *ab*, de 3 millimètres de diamètre sur 650 millimètres de longueur. Quand l'aimant mobile *ab* était dans le plan du méridien terrestre, le fil suspenseur n'éprouvait aucune torsion. A travers la douille *f*, il des-

cendait alors, dans la balance et dans une position verticale, un fil d'acier aimanté *a'b'* de mêmes dimensions transversales et longitudinales que le précédent. Ces deux aimants étaient présentés l'un à l'autre par leurs pôles de même nom ; l'aimant mobile était repoussé, et son pôle était remplacé, dans le méridien magnétique, par le pôle de l'aimant vertical. Coulomb imprimait successivement au fil suspenseur de la balance des degrés de torsion convenables pour que l'aimant mobile fût maintenu, par la répulsion de l'aimant fixe, à des distances angulaires connues du plan du méridien magnétique. Or, dans chaque position d'écartement, la répulsion de l'aimant fixe faisait évidemment équilibre à deux forces qui tendaient l'une et l'autre à ramener l'aimant mobile dans le plan du méridien magnétique : la torsion du fil suspenseur, et l'action de la terre sur cet aimant mobile. Cette action du globe était elle-même équivalente à une certaine torsion du fil suspenseur qu'il déterminait par une expérience préalable. En ajoutant ces deux torsions dans chaque position d'équilibre de l'aimant mobile, et en comparant leur *somme* à la déviation angulaire correspondante, Coulomb a trouvé que : *les répulsions magnétiques sont en raison inverse des carrés des distances auxquelles elles s'exercent.*

Coulomb a aussi appliqué la méthode des oscillations à la détermination des lois des attractions magnétiques. En face du pôle boréal d'une aiguille aimantée très courte et très massive, suspendue à un fil sans torsion et dans le plan horizontal passant par son axe de figure (Fig. 125), il plaçait le pôle austral d'un fil aimanté vertical très mince et très long. L'aiguille écartée de sa position d'équilibre

oscillait sous la double influence de l'aimant fixe et du globe terrestre ; il était facile de tenir compte de l'influence de la terre. Supposons en effet qu'on fasse les trois épreuves suivantes :

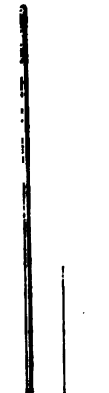


Fig. 125.

1° L'aiguille, sous l'influence de la terre *seule*, dont l'action est représentée par g, exécute k oscillations en un temps t.

2° L'aiguille, placée à une distance d de l'aimant vertical, exécute n oscillations dans le même temps t ; soit m la force *totale* agissant alors sur l'aiguille, l'action de l'aimant sera évidemment $m - g$.

3° L'aiguille, placée à une distance d' de l'aimant vertical, exécute n' oscillations dans le même temps t ; soit m' la force *totale* agissant alors sur l'aiguille, l'action de l'aimant sera évidemment $m' - g$.

D'après ce que nous avons vu précédemment (page 261), nous aurons, entre les quantités $(m - g)$ et $(m' - g)$ qui représentent les actions de l'aimant aux distances d et d', et les nombres des oscillations observées, la relation suivante :

$$\frac{m - g}{m' - g} = \frac{n^2 - k^2}{n'^2 - k^2}.$$

Mais, d'autre part, la comparaison des résultats fournis par les deux dernières expériences prouve que :

$$\frac{n^2 - k^2}{n'^2 - k^2} = \frac{d'^2}{d^2},$$

donc :

$$\frac{m - g}{m' - g} = \frac{d'^2}{d^2}.$$

Par conséquent, *les attractions magnétiques sont en raison inverse des carrés des distances auxquelles elles s'exercent.*

PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

Pour communiquer une aimantation permanente aux barreaux et aux aiguilles d'acier trempé, on peut employer divers procédés dont l'expérience a fait connaître l'efficacité.

Simple touche. — Pour aimanter une aiguille légère, il suffit de la faire glisser suivant sa longueur à l'extrémité d'un aimant puissant. Quand on a exécuté ainsi, sur les deux faces, plusieurs frictions de la même manière et dans le *même sens*, l'aiguille est aimantée. On peut employer le même procédé pour aimanter un petit barreau d'acier trempé.

Touche séparée. — Duhamel a fait connaître un excellent procédé pour aimanter régulièrement les aiguilles des boussoles, et les lames dont l'épaisseur ne dépasse

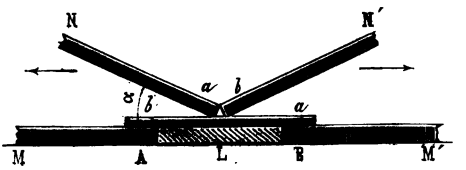


Fig. 126.

pas 4 ou 5 millimètres. L'aiguille *ab* est placée (Fig. 126) horizontalement ; sa partie centrale repose sur une pièce de bois L, tandis que, par ses extrémités, elle empiète sur

deux forts aimants fixes M, M'. Sur le milieu de l'aiguille, on appuie les extrémités de deux barreaux inclinés à 25° ou 30° sur son axe. Les pôles des aimants fixes et des aimants mobiles sont disposés comme l'indique la figure. Alors on fait glisser en même temps les aimants N, N' dans le sens des flèches; chacun d'eux parcourt ainsi une moitié de l'aiguille. Quand les barreaux glissants sont arrivés aux extrémités de l'aiguille, on les *enlève* à la fois et on les reporte au milieu. Après plusieurs frictions de ce genre sur les deux faces, l'aiguille est aimantée. Il est évident que les actions des barreaux fixes et des barreaux mobiles sont concordantes, et qu'elles tendent toutes à décomposer le fluide naturel de l'aiguille pour polariser les molécules de la même manière. Les fluides *austral* et *boréal*, rendus libres dans cette opération, sont maintenus séparés par la *force coercitive* de l'acier, et la position des pôles de l'aiguille est inverse de celle des pôles des aimants fixes et des barreaux glissants.

Double touche. — Ce procédé (Fig. 127), dû à Æpinus, est employé pour aimanter les forts barreaux d'acier.

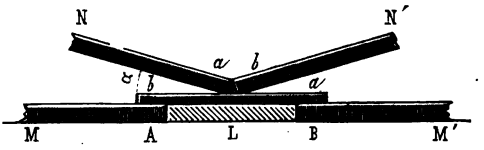


Fig. 127.

Tout étant disposé comme dans la figure précédente, les aimants glissants N, N' ne sont inclinés qu'à 15° ou 20°

sur l'axe du barreau soumis à leur influence. En partant du milieu, on promène *ensemble* les deux aimants N, N′, jusqu'à une extrémité du barreau, puis de cette extrémité à l'autre. On exécute plusieurs fois de suite ce mouvement de friction dans toute la longueur du barreau; on arrête l'opération, quand les deux aimants mobiles ont repris leur position médiane en revenant de l'extrémité opposée à celle par laquelle on a commencé. Il est évident que l'ensemble des deux aimants mobiles N, N′ a ainsi glissé un même nombre de fois sur les deux moitiés du barreau *ab* soumis à leur influence.

Ce procédé développe plus de magnétisme que celui de Duhamel, mais il a l'inconvénient de donner toujours des pôles de force inégale, et de développer souvent des points conséquents dans l'étendue du barreau.

Aimantation sous l'influence du globe terrestre. — La terre agissant comme un vaste aimant, il suffit de placer une barre de fer doux dans le plan du méridien magnétique et dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, pour en faire un *aimant temporaire;* le pôle *austral* de cet aimant temporaire est *toujours* situé vers son extrémité *inférieure*, et son pôle *boréal* vers son extrémité *supérieure*. Quand on retourne la barre, et qu'on change ses extrémités de place, les pôles conservent *toujours* la même position. Cette observation démontre que le fer doux est sans force coercitive, et que la séparation des deux fluides est *uniquement* due à l'influence terrestre.

Lorsqu'une barre de fer doux est placée dans une position parallèle à celle de l'aiguille d'inclinaison, et qu'on frappe fortement ses extrémités avec un marteau, elle

s'aimante plus énergiquement; mais, en outre, elle acquiert un certain degré de *force coercitive*, et reste aimantée d'une *manière permanente*. La torsion et le passage à la filière suffisent aussi pour donner de la *force coercitive* aux fils de fer; on peut donc les transformer en *aimants permanents*, en leur faisant subir une de ces deux opérations pendant qu'on les maintient dans une direction parallèle à celle de l'aiguille d'inclinaison. On comprend ainsi pourquoi, dans les ateliers de serrurerie, presque tous les outils et les morceaux de fer travaillés présentent des traces plus ou moins fortes d'aimantation.

Une barre d'acier trempé, placée dans une position parallèle à celle de l'aiguille d'inclinaison, éprouve aussi l'influence du globe terrestre. On peut faciliter la séparation de deux fluides, et augmenter son *aimantation permanente* en le frottant, suivant sa longueur, avec une barre verticale de fer doux.

En général, l'influence de la terre s'exerce sur les corps *magnétiques*, quelle que soit leur direction dans l'espace. Cette action atteint son *maximum* quand ces corps sont parallèles à l'aiguille d'inclinaison ; elle ne devient nulle que lorsqu'ils sont placés dans une direction perpendiculaire au plan du méridien magnétique.

Influence de la chaleur sur le degré d'aimantation. — Quelle que soit sa puissance, un aimant naturel ou artificiel chauffé au rouge blanc ne possède, après le refroidissement, aucune trace sensible de polarité magnétique. Dans les barreaux d'acier, la force coercitive a complétement disparu, ou du moins est considérablement affaiblie ; pour rendre à ces barreaux leur force première,

il suffit de les aimanter de nouveau à saturation après leur avoir communiqué une nouvelle trempe. Les aimants naturels ont perdu, dans cette épreuve, une partie de leur *force coercitive;* on peut les aimanter de nouveau, mais il est impossible de leur rendre leur *force coercitive* et leur *intensité magnétique* primitive.

Sans pousser aussi loin l'action de la chaleur, il est facile de prouver que toute élévation de température a pour résultat d'affaiblir, d'une manière permanente, l'intensité magnétique. On fait osciller un barreau sous l'influence du globe, puis on le soumet à diverses températures successivement croissantes, et, à chaque épreuve, on le fait osciller de nouveau après le refroidissement. On constate, ainsi, que l'intensité magnétique du barreau, représentée, dans chaque expérience, par le carré du nombre des oscillations exécutées dans un temps donné, varie en sens inverse de la température à laquelle il a été soumis.

M. Pouillet a particulièrement insisté sur un autre effet de la chaleur qui mérite une très sérieuse attention. Au rouge-cerise, l'acier et le fer perdent toutes leurs *propriétés magnétiques; tant qu'ils sont maintenus à cette température*, ils restent *insensibles* à l'influence des aimants les plus puissants, et n'exercent eux-mêmes aucune action sur l'aiguille aimantée. M. Pouillet a démontré que, pour tous les corps simples *magnétiques*, il existe une température au-dessus de laquelle ils cessent d'être influencés par les aimants. Cette température, qu'il appelle la *limite magnétique*, varie beaucoup d'un corps à l'autre; il résulte de ses recherches que :

1° Pour le manganèse, la *limite magnétique* est à 20° ou 25° au-dessus de *zéro ;*

2° Pour le nickel, la *limite magnétique* est vers 350°, à peu près à la température de fusion du zinc ;

3° Pour le chrome, la *limite magnétique* est un peu au-dessus de la température du rouge sombre ;

4° Pour le fer, la *limite magnétique* est à la température du rouge-cerise ;

5° Pour le cobalt, la *limite magnétique* est à une température supérieure à celle du rouge blanc le plus éclatant.

Armures des aimants. — Indépendamment des variations de température dont nous avons déjà parlé, beaucoup d'autres circonstances peuvent déterminer, dans les aimants, des affaiblissements notables d'intensité. Lorsqu'un barreau reste longtemps dans une position telle que son axe est fortement écarté de la direction que le couple terrestre tend à lui donner, les fluides libres se combinent dans une proportion plus ou moins considérable sous l'influence de l'action continue du globe, et les pôles magnétiques perdent de leur intensité. Ainsi, par exemple, un barreau ne pourrait pas, dans nos climats, être maintenu dans une position verticale, le pôle boréal en bas, sans éprouver un affaiblissement très marqué ; il suffirait, dans cette position, de lui donner quelques coups de marteau pour lui faire perdre presque toute sa force magnétique, et même pour renverser ses pôles. Lorsque plusieurs barreaux sont placés, sans ordre, dans le voisinage les uns des autres, ils s'influencent mutuellement, et s'affaiblissent d'autant plus vite qu'ils sont plus exposés à des chocs violents ou à des causes quelconques d'é-

branlement. Pour contre-balancer les effets de ces actions destructrices, on place, dans le voisinage des barreaux, des pièces de fer doux qui prennent le nom d'*armures*, et s'opposent à la recomposition des fluides libres.

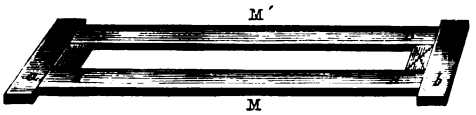


Fig. 128.

Soient (Fig. 128) M, M', deux barreaux de même longueur; plaçons-les dans une boîte parallèlement l'un à l'autre, en ayant soin de tourner leurs pôles de noms contraires du même côté; appuyons contre leurs extrémités deux pièces de fer doux. Ces barreaux sont *armés*, et les pièces de fer doux sont appelées *armures*. Le rôle de ces pièces de fer doux est facile à comprendre; chacune d'elles, dans cette position, devient un aimant temporaire qui réagit à son tour sur les barreaux, et maintient leurs fluides à l'état de liberté. Entre les extrémités des barreaux M, M', on place deux morceaux de bois qui les empêchent de se déplacer.

Quant aux barreaux et aux aiguilles qui font partie des appareils d'observation, ils ne peuvent évidemment pas être armés. Mais, par cela seul que ces aimants sont libres d'obéir à l'action du couple terrestre, ils ne sont pas exposés aux causes de destruction énoncées plus haut, et ils n'ont pas besoin d'*armures*.

Pour armer un aimant naturel E (Fig. 129), on commence par déterminer la position de ses deux centres d'ac-

tion magnétique, puis on taille, dans l'aimant, deux faces planes perpendiculaires à la ligne des pôles. Contre ces faces on applique deux lames de fer doux P, P′, maintenues par des collets de cuivre, et terminées inférieurement

Fig. 129.

par deux gros talons A, B, de fer doux. Chacune de ces lames de fer doux devient un aimant; les deux talons A, B, représentent les pôles de noms contraires du système. L'aimant, ainsi armé, est suspendu à un crampon; et l'on applique alors, contre les talons des *armures*,

une pièce de fer doux C qui soutient un seau V rempli de balles de plomb.

Le magnétisme développé dans les *armures* P, P′, et dans la pièce de fer doux C réagit sur celui de l'aimant naturel qui acquiert plus de force. En ajoutant successivement de nouvelles balles de plomb dans le seau V, on peut *nourrir* l'aimant naturel, c'est-à-dire augmenter graduellement son intensité, et l'amener à supporter un poids double de la charge qu'il était primitivement capable de soutenir. Mais si, par l'effet d'une surcharge, le contact C se détache spontanément, l'aimant éprouve un affaiblissement considérable. On peut cependant, dans ce cas, lui rendre de la force, en lui donnant d'abord à supporter une faible charge qu'on a soin d'augmenter graduellement.

Les *aimants naturels* qui ne sont pas *armés* et *suffisamment chargés* perdent de leur magnétisme avec le temps.

TROISIÈME SECTION.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

A la fin du XVIIIe siècle, au moment où Coulomb, en déterminant les lois générales des actions électriques, semblait avoir mis la dernière main à la théorie physique de l'électricité, Galvani découvrit qu'il suffit de faire communiquer, au moyen d'un *arc métallique*, les nerfs lombaires et les muscles de la cuisse d'une grenouille récemment écorchée, pour provoquer des contractions dans les masses musculaires. Le professeur de Bologne rapporta ce phénomène à l'excitation causée par une décharge électrique; il considéra le muscle comme un *condensateur animal* chargé d'électricité positive à l'intérieur et d'électricité négative à l'extérieur, et ne vit, dans les nerfs et l'*arc métallique*, que de simples conducteurs établissant la communication entre les deux armures de cette *bouteille de Leyde animale*. La découverte de Galvani produisit une grande sensation; les physiciens et les physiologistes s'empressèrent de répéter ses expériences. L'exactitude des phénomènes observés par le médecin de Bologne fut hautement et généralement reconnue; mais il n'en fut pas de même de l'explication qu'il en avait donnée. Volta, professeur de physique à Pavie, s'éleva contre l'assimilation d'un muscle à une bouteille de Leyde. Comme Galvani, il rapporta la contraction à l'excitation

causée par une décharge électrique; mais, au lieu de chercher dans le muscle lui-même la source de cette électricité, il entreprit de démontrer qu'elle prenait naissance *dans l'arc de communication*. Ce n'est pas ici le lieu de faire l'histoire des travaux de Galvani; nous montrerons ailleurs que, si quelques-unes de ses idées théoriques sont tombées dans un juste discrédit, la partie expérimentale de son œuvre est restée inattaquable, et que le professeur de Pavie était dans l'erreur lorsqu'il se refusait à reconnaître l'intervention de l'*électricité animale* dans cette contraction des masses musculaires de la grenouille. Cependant, dans la lutte mémorable qu'il soutint à ce sujet contre Galvani, Volta découvrit un ordre de phénomènes dont rien ne pouvait faire soupçonner l'existence, ouvrit aux observateurs un immense champ de recherches, et posa les bases d'une science nouvelle, de l'*électricité dynamique*.

Après avoir constaté qu'un assemblage de conducteurs métalliques et de conducteurs liquides s'électrise spontanément, et que les extrémités du système prennent des tensions opposées, Volta chercha à établir que le *contact* des substances hétérogènes était la véritable cause de ce développement d'électricité. Parmi les expériences très variées qu'il entreprit pour démontrer ce principe, nous nous contenterons de rapporter la suivante. Soit E (Fig. 130) un électroscope condensateur à *plateaux de cuivre*. Volta formait une lame métallique avec deux morceaux C, Z, l'un de *cuivre*, l'autre de *zinc*, soudés bout à bout. Puis il prenait la lame métallique entre les doigts par l'extrémité *zinc*, et, pendant qu'il faisait communiquer le plateau inférieur avec le sol en le

touchant avec les doigts de l'autre main, il appliquait l'extrémité *cuivre* de la lame sur le bord du plateau supérieur. Après ce contact, toutes les communications étant

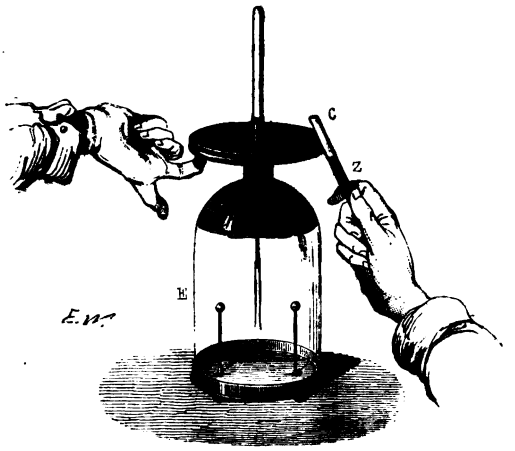


Fig. 130.

rompues, il soulevait le plateau supérieur par son manche isolant; les feuilles d'or de l'électroscope divergeaient immédiatement. Pendant l'opération, le plateau *supérieur* s'était chargé d'électricité *négative* et le plateau *inférieur* d'électricité *positive*. Ne tenant aucun compte des réactions qui se passaient entre les doigts de l'observateur et un métal aussi oxydable que le zinc, Volta interprétait ainsi le résultat de cette expérience : A la *surface de contact* des morceaux de *zinc* et de *cuivre*, il y a un dégagement d'électricité, le zinc devient *positif*, et le cuivre *négatif;* le zinc laisse écouler son électricité positive dans le sol à travers le corps de l'observateur, et se maintient à

l'*état neutre;* l'électricité *négative* du cuivre passe sur le plateau supérieur du condensateur, et le plateau inférieur, en communication avec la terre, prend, par induction, une charge d'électricité *positive*. D'ailleurs, à la surface de contact du zinc et du cuivre, le développement d'électricité continue jusqu'à ce que le plateau supérieur soit en équilibre de tension avec la *charge négative* que la *force de contact* peut développer et retenir sur l'extrémité *cuivre* de la lame. Volta avait bien observé que le véritable moyen d'assurer le succès de cette expérience était d'opérer avec des *doigts mouillés;* mais il pensait que le liquide n'agissait, dans ce cas, qu'en augmentant la conductibilité de la peau, et en favorisant le passage de l'électricité *positive* du *zinc* dans le sol.

A la suite de beaucoup de tentatives de ce genre, Volta se crut autorisé à poser les principes suivants :

A la surface de contact de deux métaux hétérogènes, il se développe une *force particulière* sous l'influence de laquelle l'un des métaux prend une tension *positive*, et l'autre une tension *négative*. Pour deux métaux de nature donnée, la *différence algébrique* de ces tensions opposées est *constante*.

Cette force *électromotrice* s'oppose à ce que les deux électricités rendues libres se combinent à travers la surface de contact des deux métaux. Quand l'ensemble est isolé, ces deux métaux en contact conservent donc, malgré leur conductibilité, une *différence de tension* qui est la mesure de la force *électromotrice*.

L'action de la force *électromotrice* est instantanée, mais son intensité et le sens dans lequel elle agit dépendent de

la nature des métaux accouplés. L'énergie et même le signe de la tension que prend un métal donné peuvent donc varier avec la nature du métal qui lui est associé.

Dans ses recherches, Volta s'occupa aussi des effets électriques produits au contact des corps qui ne sont pas de nature métallique. Il fut conduit à admettre que, du moment où deux corps peuvent conduire l'électricité, il suffit de les mettre en contact pour que leur surface de séparation devienne le siége d'une force *électromotrice*. Prenant en considération l'intensité des effets produits par ces accouplements de substances hétérogènes, il divisa tous les *corps conducteurs* en deux grandes classes :

1re classe.—*Corps conducteurs parfaits électromoteurs.* Cette première classe comprend tous les métaux et le charbon calciné.

2e classe. — *Corps conducteurs imparfaits électromoteurs.* Cette seconde classe comprend les liquides tels que l'eau pure, les dissolutions acides, alcalines, salines, etc. D'après Volta, la force *électromotrice* développée à la surface de contact de deux corps de la 2e classe, ou d'un corps de la 2e classe et d'un *métal*, est extrêmement faible. Cette force est *négligeable* par rapport à celle qui prend naissance au contact de deux corps appartenant à la 1re classe.

Revenons maintenant à l'expérience de la figure 130. Tout étant disposé de même, au lieu de tenir la lame métallique par l'extrémité *zinc*, saisissons-la par l'extrémité *cuivre*, et touchons le plateau supérieur du condensateur avec le morceau de *zinc*. Dans ce cas, le condensateur ne se charge pas. Volta expliquait ainsi ce résultat négatif : Puisque, disait-il, le morceau de *zinc* est, par

ses deux extrémités, en contact immédiat avec du *cuivre*, il se développe dans le système deux forces *électromotrices égales* et de *sens contraires;* par conséquent, l'effet résultant doit être *nul*. Pour démontrer l'exactitude de ce raisonnement, il plaçait, entre le *zinc* et le plateau supérieur de l'électroscope, un corps *imparfait électromoteur*, un morceau de *papier mouillé*. Dans sa manière de voir, la force *électromotrice*, produite par le contact du *papier mouillé* et du *zinc*, était extrêmement faible. Ce papier interposé, agissant comme simple conducteur, permettait à l'électricité du *zinc* de passer sur le plateau du condensateur, et l'effet final devait traduire l'action de la force *électromotrice* développée au contact du *zinc* et du *cuivre* de la lame métallique. Après l'interposition de papier mouillé, le plateau supérieur de l'électroscope se charge, en effet, d'électricité positive.

Si nous courbons, en fer à cheval, la lame métallique formée par la réunion d'un morceau de zinc et d'un morceau de cuivre soudés, et si nous immergeons ses deux extrémités dans de l'acide sulfurique étendu d'eau (Fig. 131),

Fig. 131.

les principes précédemment exposés peuvent nous faire prévoir ce qui doit se passer. A la surface de contact du

cuivre C et du zinc Z, la force électromotrice sépare les deux électricités : le zinc Z prend la tension *positive*, et le cuivre C prend la tension *négative*. Mais les extrémités de la lame métallique sont réunies par un liquide *conducteur* et *imparfait électromoteur ;* par conséquent, l'électricité *positive* du zinc Z et la *négative* du cuivre C se recombinent à travers ce liquide. Cependant, pour que la force *électromotrice* soit satisfaite, il faut qu'il y ait une différence de tension entre le zinc Z et le cuivre C ; à mesure donc que les tensions contraires des extrémités hétérogènes de la lame métallique se neutralisent à travers le liquide, elles sont instantanément reproduites par l'action de la force électromotrice développée au contact du cuivre et du zinc. Dans cet appareil, il y a donc un mouvement continuel d'électricité. Le système constitué par la lame métallique courbée et le liquide acide représente un circuit fermé dans lequel, en rapportant tout au mouvement de l'électricité *positive*, nous dirons qu'il y a un flux continu, un véritable *courant d'électricité* dirigé du zinc Z au cuivre C dans le liquide, et du cuivre au zinc à travers la lame métallique. Quand nous connaîtrons les propriétés de l'*électricité dynamique* et les moyens employés pour constater la présence des *courants*, nous verrons, en effet, que l'appareil représenté figure 131 est un véritable *électromoteur*, et que le sens du *courant* d'électricité est bien celui que nous avons précédemment déduit des principes développés par Volta.

La lame métallique (Fig. 131), composée d'un morceau de zinc Z et d'un morceau de cuivre C soudés ensemble, est ce que Volta appelait un *couple*. Pour lui, le liquide du

vase M jouait le rôle de simple conducteur ; c'était l'*arc* établissant la communication entre les deux éléments du couple, complétant le circuit, et permettant la circulation de l'électricité mise en mouvement par la force *électromotrice*. Il donnait aussi aux métaux hétérogènes la forme de disques ; dans ce cas, le *couple* était composé (Fig. 132) d'un disque de zinc Z et d'un disque de cuivre C

Fig. 132.

simplement superposés ou soudés l'un à l'autre. Ajoutons d'ailleurs que, les métaux étant tous de bons *électromoteurs*, il suffit, pour constituer un *couple voltaïque*, d'assembler deux lames ou deux disques de métaux hétérogènes quelconques.

Volta avait donc découvert une nouvelle source d'électricité, et lorsque le circuit était fermé (Fig. 131), l'agent fourni par son *couple*, au lieu de s'accumuler sous forme d'*électricité statique* comme sur les conducteurs de la machine électrique, se montrait sous forme d'un flux d'électricité en mouvement, d'un véritable *courant d'électricité dynamique*. Mais le flux d'électricité dynamique émané d'un *simple couple* a très peu d'intensité; les effets qu'il produit sur son passage sont très faibles. La découverte de Volta serait demeurée stérile si, par une étude plus approfondie des propriétés de la force électromo-

trice, il n'avait pas trouvé le moyen d'augmenter et de diminuer à volonté l'énergie de ces courants électriques.

Volta comprit, en effet, que l'action de la force électromotrice doit être indépendante de l'état électrique dans lequel est maintenu l'un des deux éléments métalliques du couple. Un mot d'explication est nécessaire pour faire comprendre toute la portée de ce principe. Soient *c* et Z (Fig. 133) les deux disques de cuivre et de zinc superposés pour constituer le couple, et supposons que la force *électromotrice*, développée au contact du cuivre et du zinc, soit capable de produire et de maintenir, sur les deux métaux, des tensions contraires dont la *différence algébrique* soit 10.

1° Si le couple est *isolé* (Fig. 133), la force électromotrice sépare les deux électricités à la surface de contact; instan-

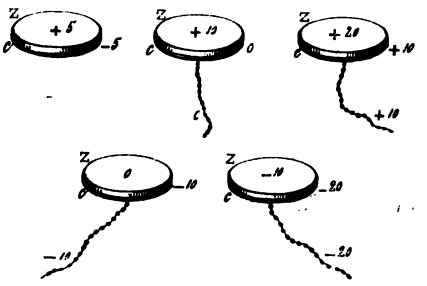


Fig. 136. Fig. 137.

tanément le zinc prend une tension + 5, et le cuivre une tension — 5; la différence des tensions est 10, la force électromotrice est satisfaite, et le couple *isolé* persiste dans cet état d'équilibre.

2° Si le couple (Fig. 134) communique avec le sol par le disque inférieur, l'élément cuivre du couple est nécessairement maintenu à *zéro*. Cependant la force électromotrice sépare les deux électricités à la surface de contact, la *négative* se perd dans le sol, et le disque de zinc prend instantanément la tension + 10. Ici, encore, la différence des tensions est 10, la force électro-motrice est satisfaite, et le couple persiste dans cet état d'équilibre.

3° Le disque inférieur (Fig. 135) est en communication avec une source d'électricité qui le maintient à la tension + 10. Dans ce cas, la force électro-motrice sépare les deux électricités, accumule la *positive* sur le zinc, et repousse la *négative* sur le cuivre où elle est neutralisée par le fluide de nom contraire de la source électrique avec laquelle le cuivre est en communication. Ce mouvement continue jusqu'à ce que, le disque de cuivre conservant la tension + 10, le disque de zinc ait acquis la tension + 20. Alors la différence des tensions est 10, et l'équilibre existe dans le couple.

4° Le disque inférieur (Fig. 136) est en communication avec une source d'électricité qui le maintient à la tension — 10. La force électromotrice s'oppose à tout passage d'électricité négative du disque inférieur sur le disque supérieur, le zinc reste à *zéro*, le cuivre est à — 10. La différence des tensions est 10, et le couple est en équilibre.

5° Enfin, le disque inférieur (Fig. 137) est en communication avec une source électrique qui le maintient à la tension — 20. Dans ce cas, la force électro-motrice laisse passer, sur le disque supérieur, une quantité d'électricité négative suffisante pour lui donner la tension — 10. Le

zinc est alors à — 10, le cuivre à — 20, la différence des tensions est 10 ; la force électromotrice est satisfaite, et le couple persiste dans cet état d'équilibre.

En reconnaissant que l'action de la force *électromotrice* est indépendante de l'état électrique dans lequel est maintenu l'un des deux métaux du couple, Volta compléta sa découverte. S'appuyant sur ce principe, il comprit qu'il suffisait de superposer les couples dans un ordre déterminé, et de les séparer les uns des autres par des disques *conducteurs inertes* ou *imparfaits électromoteurs*, pour augmenter à volonté l'intensité du *courant électrique*. Il fut ainsi conduit à doter la science du plus bel instrument de la physique moderne : de la *pile* qui porte son nom.

Sur un socle isolant S (Fig. 138), il plaça un premier couple dont le cuivre était directement appliqué sur le

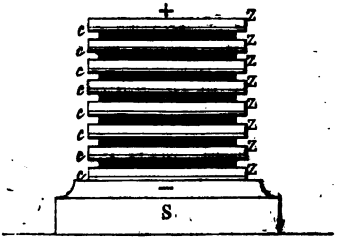


Fig. 138.

support. Sur ce premier couple, il plaça une rondelle *o* de drap mouillé avec de l'acide sulfurique étendu d'eau ; puis, sur ce disque de drap, un second couple dont les métaux étaient disposés suivant le même ordre que dans le premier. Il continua ainsi cette superposition

alternative de rondelles de drap mouillé et de couples, en ayant soin de conserver la même position relative aux plaques métalliques de chacun des couples. L'appareil était terminé, à sa partie inférieure, par un disque de cuivre *c*, et à sa partie supérieure, par un disque de zinc Z; chaque couple était séparé, par une rondelle de drap mouillé, du couple qui le précédait et de celui qui le suivait. Cet assemblage de couples est connu sous le nom de *pile de Volta* ou *pile à colonne*.

Dans une *pile* ainsi disposée, d'après les principes de Volta, la force électromotrice agit à la surface de contact des métaux de chaque couple, et les rondelles de drap mouillé jouent simplement le rôle de conducteurs. Dès lors, le cuivre de chacun des couples doit avoir la *même tension* que le zinc du couple qui le précède et dont il est séparé par un corps conducteur *non électromoteur;* en même temps, dans chaque couple, il doit exister, entre le disque de zinc et le disque de cuivre, une différence de tension égale à celle que la force électromotrice est capable de déterminer et de maintenir dans un couple isolé.

Dans le chapitre second, nous étudierons le mode de distribution des tensions électriques dans cet appareil, et nous ferons voir comment l'expérience s'accorde avec la théorie de la force électromotrice pour démontrer que, dans la pile à colonne *telle que Volta la construisait* (Fig. 138):

1° L'extrémité terminée par un disque de cuivre prend la tension négative, et l'extrémité terminée par un disque de zinc prend la tension positive.

2° La différence algébrique des tensions accumulées aux extrémités de la pile est proportionnelle au nombre de couples dont elle se compose.

Pour le moment, cette discussion serait prématurée et nous devons nous contenter d'une étude empyrique de la pile à colonne. Ainsi, expérimentalement et en dehors de toute idée théorique, nous acquerrons, sur les propriétés fondamentales de la pile et des courants électriques, des notions suffisantes pour procéder à la recherche des lois de production et de manifestation de l'électricité dynamique. Mais, avant de commencer cette étude, arrêtons-nous encore un instant sur le *couple voltaïque fermé*, afin de mieux préciser le rôle de chacun des trois éléments, zinc, cuivre et liquide acide, dont il se compose.

Reprenons (Fig. 139) la lame métallique composée d'un morceau de zinc Z, et d'un morceau de cuivre C soudés

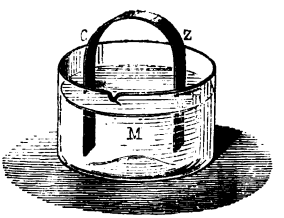


Fig. 139.

ensemble, recourbée en fer à cheval et plongée, par ses extrémités, dans de l'acide sulfurique étendu d'eau. Nous avons vu que, dans ce petit appareil, l'électricité positive chemine du zinc au cuivre à travers le liquide acide, et du

cuivre au zinc à travers l'arc métallique. D'après les idées de Volta sur l'origine de la force électro-motrice, le mouvement prend naissance à la surface de contact des deux métaux, la lame métallique est l'appareil producteur, et le liquide ne joue que le rôle de conducteur. Cette manière de comprendre la génération du courant électrique ne peut plus aujourd'hui être acceptée; dans le chapitre deuxième nous démontrerons, par des faits incontestables, que le mouvement électrique est dû, non pas au contact des deux métaux hétérogènes, mais à l'action du liquide acide sur le zinc, qu'il prend naissance à la surface de contact du liquide et du métal attaqué, et qu'il se propage dans le sens indiqué par Volta. Dans ce circuit formé de deux métaux et d'un liquide actif, l'impulsion doit donc être localisée dans la couche d'action chimique qui s'établit entre le zinc et le liquide acide; le reste de l'appareil joue le rôle de simple conducteur. Sans rien changer à ce que nous avons dit, d'après Volta, des propriétés spéciales de la force électromotrice, nous sommes donc conduit à déplacer le siége de cette force, à en chercher la source dans l'action du liquide sur le métal attaqué, et à modifier la définition du couple.

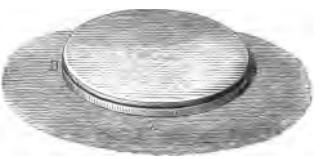


Fig. 140.

Couple voltaïque. — Dans l'état actuel de la science, nous devons considérer le *couple voltaïque* (Fig. 140) comme

constitué par un disque de zinc Z et un disque de cuivre C, séparés par une rondelle D de drap imbibé d'acide sulfurique étendu, ou de tout autre liquide capable d'agir chimiquement sur le zinc. La force électromotrice développée par cette action chimique sépare les deux électricités, le disque de *zinc* prend la tension *négative* et le disque de *cuivre* la tension *positive* (1).

Il résulte de là que, dans la pile à colonne *telle que Volta la construisait* (Fig. 138), le disque de cuivre de l'extrémité inférieure et le disque de zinc de l'extrémité supérieure sont parfaitement inutiles, et peuvent être enlevés sans altérer les propriétés de l'appareil. Après cette suppression, l'extrémité inférieure garde la tension *négative*, l'extrémité supérieure garde la tension *positive*, et la *différence de ces deux tensions* conserve la même valeur. Mais, dans cette pile ainsi modifiée et ramenée à ses éléments essentiels, l'extrémité chargée d'électricité *positive* est terminée par un disque de *cuivre*, et l'extrémité chargée d'électricité *négative* est terminée par un disque de *zinc*.

Pile à colonne. — Conformément aux idées que nous venons d'indiquer sur l'origine de la force électromotrice

(1) Malgré leur ressemblance apparente, le couple tel que Volta le concevait (Fig. 132), et le couple tel que nous venons de le décrire (Fig. 140), sont essentiellement différents. Dans le couple Volta (Fig. 132), les surfaces des lames métalliques Z, C, sont *directement appliquées l'une sur l'autre*, et la forte ligne noire D sert seulement à indiquer la *soudure* qui les réunit. Au contraire, dans le couple de la figure 140, il n'existe *aucun point de contact* entre l'élément zinc Z et l'élément cuivre C, et la forte ligne noire D indique le *disque de drap mouillé* qui sépare complétement les deux lames métalliques.

et dont nous démontrerons plus tard l'exactitude, pour construire la pile à colonne, nous plaçerons (Fig. 141) sur un socle de bois verni M, entre trois tiges verticales de verre, une série de couples voltaïques pareils à celui de la figure 140, en ayant soin de les disposer de telle manière que deux couples successifs se touchent par leurs métaux hétérogènes (1). L'extrémité inférieure de l'appareil sera terminée par un disque de zinc Z, et l'extrémité supérieure par un disque de cuivre C. La pile ainsi construite diffère de la pile telle que Volta la construisait et représentée figure 138 en ce qu'on a supprimé deux plaques métalliques *inutiles*, le disque de cuivre de l'extrémité inférieure et le disque de zinc de l'extrémité

Fig. 141.

(1) Dans la figure 141, le zinc est représenté par la lame métallique *épaisse*, le cuivre par la lame métallique *mince*, et la rondelle

supérieure. Il est facile de démontrer, d'ailleurs, que les extrémités de la pile à colonne dont la figure 141 explique la construction ont des tensions électriques contraires.

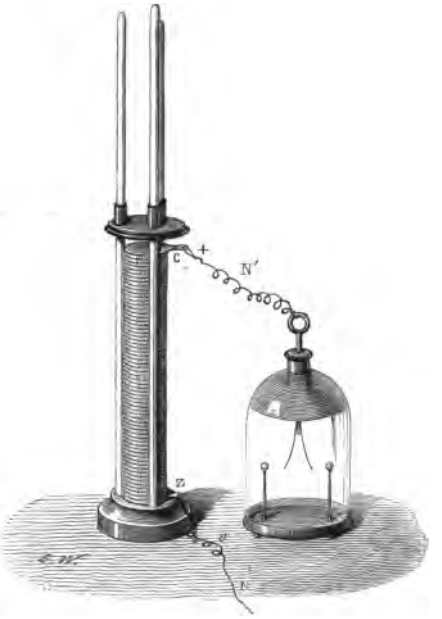


Fig. 142.

Maintenons (Fig. 142) le premier zinc Z à *zéro* en le mettant en communication avec le sol au moyen d'un fil

de drap mouillé par une *forte* ligne noire. Il est facile de voir que : 1° chaque couple est formé d'une lame de zinc et d'une lame de cuivre séparées par une rondelle de drap mouillé ; 2° le contact est *immédiat* entre la lame de cuivre et la lame de zinc de deux couples successifs.

métallique N, et touchons la tige d'un électroscope à feuilles d'or avec un fil métallique N' fixé au dernier disque de cuivre C ; immédiatement les feuilles de l'électroscope divergent, et l'expérience démontre que l'électricité cédée par le dernier disque de cuivre est *toujours positive*. Il suffit de renverser l'appareil pour que sa partie inférieure se termine par un disque de cuivre, et sa partie supérieure par un disque de zinc. Si, alors, nous maintenons le premier disque de cuivre à *zéro* en le mettant en communication avec le sol, et si nous touchons la tige de l'électroscope avec un fil métallique fixé au dernier zinc, les feuilles d'or divergent aussi, mais l'expérience prouve que, dans ce cas, elles sont toujours chargées d'*électricité négative*. Ainsi donc, quand la pile communique avec le sol par un de ses bouts, son extrémité *isolée* se charge d'*électricité statique*. La *tension* de l'extrémité *isolée* est *positive* quand elle se termine par un *disque de cuivre;* elle est *négative* quand elle se termine par un *disque de zinc*.

Prenons maintenant (Fig. 143) une pile isolée par ses deux extrémités, et touchons les deux plateaux d'un électroscope condensateur avec des fils métalliques fixés l'un au premier disque de zinc Z, et l'autre au dernier disque de cuivre C. Quelque courte que soit la durée du contact, les feuilles d'or divergent après l'écartement des plateaux. L'expérience montre que, *toujours*, la *tension* des feuilles d'or est *négative* quand le plateau inférieur de l'électroscope a été mis en communication avec le *premier zinc* Z, et qu'au contraire elle est *positive* quand le plateau inférieur a été mis en communication avec le *dernier cuivre* C.

Les deux extrémités d'une pile *isolée* ont donc des *tensions électriques opposées ; constamment*, celle du *dernier*

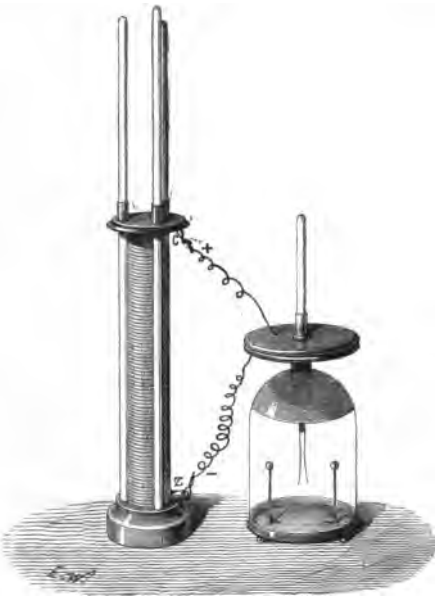


Fig. 143.

disque de cuivre est *positive*, et celle du *premier disque de zinc négative*.

Les extrémités de la pile prennent le nom de *pôles*. L'extrémité *cuivre*, dont la *tension est positive*, s'appelle le *pôle positif;* l'extrémité *zinc*, dont la *tension est négative*, s'appelle le *pôle négatif*.

Si nous faisons communiquer par un fil métallique les deux extrémités d'une pile isolée (Fig. 144), l'extrémité

cuivre, ou *pôle positif*, devra nécessairement se décharger sur le *pôle négatif*, et un mouvement d'électricité s'établira de C en Z à travers l'arc conducteur M. Mais l'expérience démontre que le phénomène ne se borne pas à

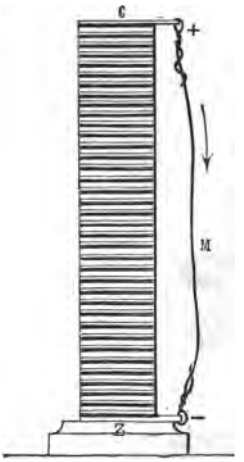


Fig. 144.

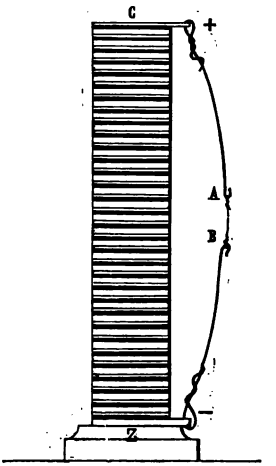


Fig. 145.

une *seule décharge*, comme dans le cas où deux corps chargés d'électricités contraires sont mis en présence. La pile est le siége d'un travail particulier dont le résultat est de rétablir les *tensions polaires* à mesure qu'elles se neutralisent, et d'entretenir, à travers l'arc conducteur M, un *flux continu* d'électricité dirigé de C en Z. En effet :

1° Si les deux bouts A et B du conducteur interpolaire rompu sont réunis (Fig. 145) à l'aide d'un fil de platine de très petit diamètre, ce fil s'échauffe et reste incandescent

tant que la communication subsiste. Quand la pile est suffisamment forte, ce fil est fondu.

2° Si, après avoir mis en contact les extrémités du fil interpolaire rompu, nous les écartons vivement (Fig. 146), un jet lumineux, une véritable *étincelle*, s'élance de l'une à l'autre, à travers l'espace qui les sépare.

Tant que la communication entre les extrémités d'une *pile* reste établie au moyen d'un corps conducteur, il passe donc, à travers cet arc interpolaire, un flux continu d'un *agent* qui possède toutes les propriétés calorifiques et lumineuses de l'électricité. Nous verrons plus tard que ce *courant*, dirigé du pôle positif au pôle négatif, produit les mêmes effets chimiques que la décharge électrique.

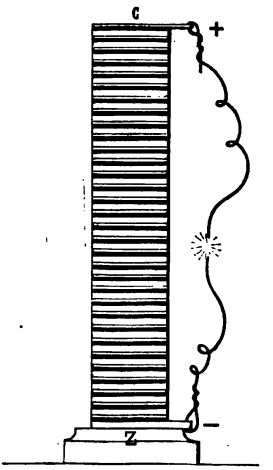


Fig. 146.

Force électromotrice. — Dans un circuit voltaïque fermé, ce mouvement continu d'électricité est le résultat de l'action d'une *force* de nature particulière, d'une *force électromotrice* développée dans chacun des couples de la pile. Nous prouverons que cette *force* est produite à la surface de contact du liquide actif et du métal attaqué; mais, tout en repoussant les idées de Volta sur son siége et sur son origine, nous devons ajouter que les travaux des observateurs modernes ont pleinement confirmé l'exactitude de la définition de cette force

telle qu'elle a été donnée par ce grand physicien. Ainsi :

1° La force *électromotrice* détermine, dans le couple isolé, une distribution des deux fluides électriques telle que les tensions de ses deux éléments métalliques sont *égales* et de *nature contraire*. Ces tensions *opposées* ne peuvent pas se neutraliser à travers le couple lui-même ; leur *différence algébrique* est *constante*, et sert de *mesure* à la force *électromotrice* qui les tient en équilibre.

2° Cette force est continue, et agit avec assez de rapidité pour réparer instantanément toute perte de tension éprouvée par les surfaces métalliques. Quand le circuit du couple n'est pas fermé, elle contre-balance la déperdition d'électricité due au contact de l'atmosphère, et *maintient* les *tensions polaires primitives*. Quand les deux métaux du couple communiquent par un conducteur quelconque, elle *rétablit les tensions polaires* à mesure qu'elles se neutralisent, et *entretient* un *courant électrique* dirigé du *pôle positif* au *pôle négatif* à travers l'arc conducteur, et du *pôle négatif* au *pôle positif* à travers le couple lui-même.

3° La force électromotrice est indépendante de l'état électrique dans lequel un des métaux du couple est maintenu. Dans tous les cas, *la différence algébrique* des tensions des deux métaux reste *constante*.

Les deux premières propriétés de la force *électromotrice* suffisent pour expliquer les phénomènes observés avec un *couple seul*, soit lorsque les deux pôles sont en communication, soit quand le circuit n'est pas fermé. La troisième rend compte de l'effet produit par l'association en série de plusieurs couples semblables, et de la supé-

riorité du courant fourni par une pile sur le courant émané d'un seul couple.

Formes diverses de la pile voltaïque.—Tout en conservant les dispositions fondamentales adoptées par Volta, les physiciens ont cherché à modifier la pile électrique dans le double but de la rendre plus puissante et plus facile à manier. Ils ont construit, ainsi, des piles très différentes par leurs formes extérieures, mais dans lesquelles les relations des liquides acides et des métaux sont les mêmes que dans la pile à colonne.

Pile à couronne. — Cette pile (Fig. 147) se compose des éléments métalliques de la pile à colonne disposés, suivan

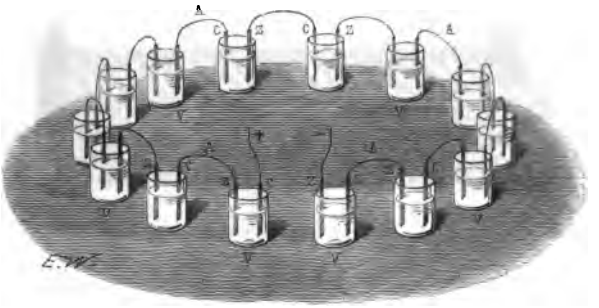


Fig. 147.

un ordre déterminé, dans une série de vases de verre V, V, V, V..., remplis d'acide sulfurique étendu au vingtième ou au trentième. Chaque vase contient une lame de zinc Z et une lame de cuivre C séparées par le liquide acide. Dans un vase intermédiaire quelconque, le cuivre communique avec le zinc du vase suivant, et le zinc avec le cuivre du vase précédent, au moyen des arcs métalliques

A, A, A... Il est facile de voir que, dans cette pile, chaque vase de verre V représente un couple complet, et que les arcs métalliques A, A, A.., sont de simples moyens de communication établis pour remplacer le contact direct des faces opposées des métaux hétérogènes de deux couples contigus de la pile à colonne. Des fils métalliques destinés à fermer le circuit sont fixés aux plaques terminales ; d'ailleurs, l'extrémité *cuivre* représente le pôle *positif*, et l'extrémité *zinc* le pôle *négatif* de l'appareil.

Pile à auges. — La construction de cette pile (Fig. 148) est très simple. Après avoir enduit d'un mastic isolant

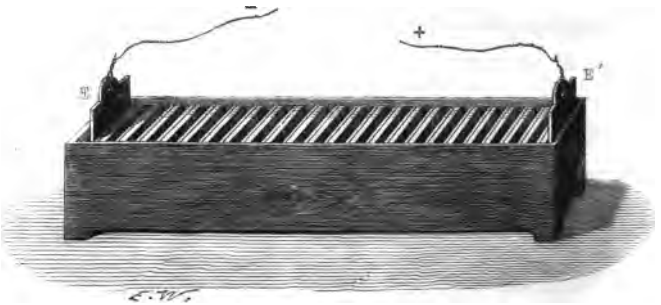


Fig. 148.

l'intérieur d'une auge prismatique de bois, on divise sa cavité en cellules distinctes, au moyen de cloisons métalliques placées de champ perpendiculairement à son axe de figure. Ces diaphragmes métalliques sont composés d'une lame de cuivre et d'une lame de zinc soudées ensemble ; ils sont d'ailleurs disposés de telle manière que toutes les faces *cuivre* regardent du même côté, et toutes les faces *zinc* du côté opposé. Quand on remplit, avec de l'acide

sulfurique étendu, les cellules circonscrites par les diaphragmes, chacune d'elles constitue un couple voltaïque complet; en effet, ses parois opposées sont formées par des lames métalliques hétérogènes séparées par un liquide acide. Les fils destinés à mettre les pôles en communication sont fixés à deux plaques métalliques E, E', qu'on plonge dans les deux dernières cellules, et qui représentent les pôles de l'appareil.

Pile de Wollaston. — Dans le couple de Wollaston, on donne aux plaques métalliques la forme représentée Figure 149. La plaque de zinc Z est surmontée d'une petite

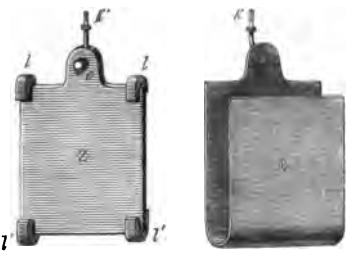


Fig. 149.

colonne de cuivre k', et munie d'un manche isolant fixé en o. La plaque de cuivre C est reployée sur elle-même de manière à envelopper la plaque de zinc sans la toucher; sur une de ses extrémités est fixée une petite colonne de cuivre k.

Pour construire le couple (Fig. 150), on place la lame de zinc Z entre les deux feuilles de la lame de cuivre C; ces deux lames métalliques sont assujetties l'une à l'autre au moyen de morceaux de bois l, l' qui ne

leur permettent pas de se déplacer, et s'opposent à tout contact direct. Quand cet appareil, saisi par le manche isolant **M**, est plongé dans le vase de verre **V** rempli d'acide sulfurique étendu d'eau, le couple est complet. Le

Fig. 150.

pôle *positif* est représenté par la colonne *k* soudée à la lame de cuivre, le pôle *négatif* par la colonne *k'* fixée sur la lame de zinc. Avec un couple de ce genre dont la lame de zinc a environ 4 décimètres carrés de surface, le courant électrique est assez intense pour rougir un fil fin de platine, fixé d'une part à la colonne *k*, et d'autre part à la colonne *k'*.

Pour construire une pile de Wollaston (Fig. 151), on

fixe un certain nombre de ces couples à la face inférieure d'une traverse de bois T soutenue, elle-même, par deux montants de bois M, M'. Le dernier cuivre communique avec un godet métallique K rempli de mercure, qui repré-

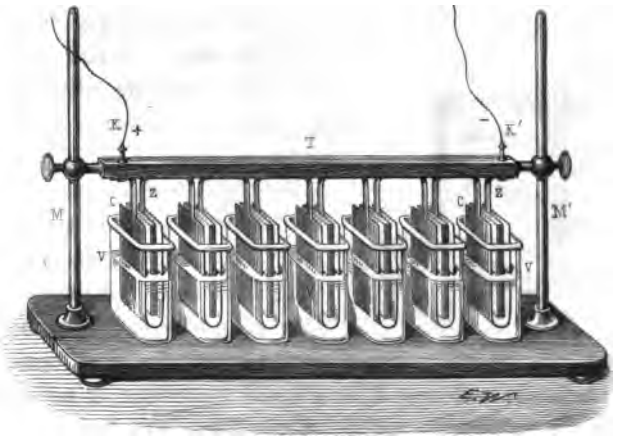


Fig. 131.

sente le pôle *positif;* le dernier zinc communique avec un godet pareil K'qui représente le pôle *négatif*. D'ailleurs, les lames métalliques sont disposées de telle façon que chaque couple intermédiaire communique par son élément cuivre avec le zinc du couple précédent, et par son élément zinc avec le cuivre du couple suivant. Au-dessous de chaque groupe de lames métalliques est placé un vase de verre rempli d'acide sulfurique étendu d'eau. La disposition des montants M, M', permet de déplacer la traverse T parallèlement à elle-même, et de lui faire occuper des posi-

tions plus ou moins élevées. Quand la traverse T est assez abaissée pour que les lames métalliques plongent dans le liquide des vases de verre correspondants, les couples sont complétés et la pile est *chargée*.

Pile en hélice. — Pour construire le couple de la pile en hélice, on enroule, sur un cylindre de bois B (Fig. 152), une large lame de zinc Z, et une large lame de cuivre C. Ces lames sont garnies de lisières de drap, *l*,*l*,*l*, *l'*,*l'*,*l'*, réunies les unes aux autres par des ficelles, et destinées à s'opposer à tout contact direct de ces deux éléments métalliques. Pour compléter le couple, on plonge le cylindre ainsi formé dans un vase de bois V, mastiqué à l'intérieur, et rempli d'acide sulfurique étendu d'eau (Fig. 153). Le couple en hélice n'est évidemment qu'une modification du couple de Wollaston dont on a beaucoup étendu les surfaces métalliques. Dans chaque couple, d'ailleurs, le pôle *positif* est toujours sur le cuivre et le pôle *négatif* sur le zinc. Pour construire une *pile en hélice*, on dispose, en série, plusieurs couples semblables, et l'on fait communiquer deux couples successifs par leurs métaux hétérogènes. Ces appareils électromoteurs ont une très grande puissance physique, on les emploie avec avantage pour déterminer l'incandescence de fils métalliques d'une très grande longueur et d'un diamètre assez considérable.

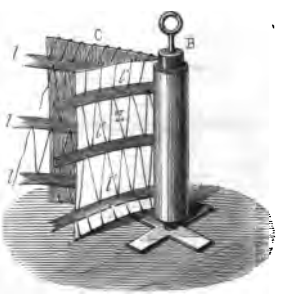


Fig. 152.

A la fin du troisième chapitre, après avoir analysé les phénomènes qui se passent dans un couple voltaïque,

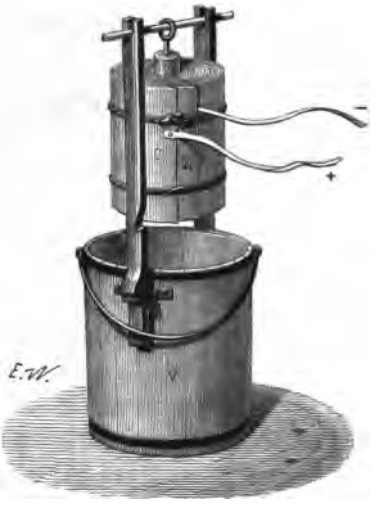


Fig. 153.

nous donnerons la description de piles très puissantes, d'un usage très commode, et aujourd'hui généralement employées.

CHAPITRE PREMIER.

PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-DYNAMIQUES.

En 1820, OErsted (1) découvrit l'influence du courant électrique sur l'aiguille aimantée; la même année, quelques mois après, Ampère (2) fit connaître les premiers faits relatifs à l'action mutuelle de deux courants électriques. Dans cette voie nouvelle, les travaux et les découvertes se multiplièrent avec une rapidité surprenante. En 1826 (3), Ampère publia une théorie générale des phénomènes électro-dynamiques, qui établit un lieu commun entre les actions des courants sur eux-mêmes et sur les aimants, les réactions des aimants et de la terre sur les courants, et les phénomènes si variés du magnétisme proprement dit. Nous ne pouvons pas, ici, suivre la grande conception d'Ampère dans tous ses développements, nous devons nous contenter de faire connaître les faits d'observation qui lui servent de base.

ARTICLE PREMIER.

ACTION DES COURANTS SUR LES COURANTS.

Toutes les actions des courants sur les courants se déduisent d'un petit nombre de propositions fondamentales

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1820, t. XIV, p. 417.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1820, t. XV, p. 69 et 170.
(3) *Mémoires de l'Académie royale des sciences*, 1827, t. VI, p. 175.

dont la vérité peut être facilement et directement démontrée par l'expérience.

1re proposition. — Deux courants parallèles se repoussent quand ils marchent en sens inverse, et s'attirent quand ils marchent dans le même sens.

1° Soit ABC (Fig. 154), un petit équipage très léger, composé de fils de cuivre, mobile sur une pointe métallique qui repose elle-même sur un plan de verre fixé au fond

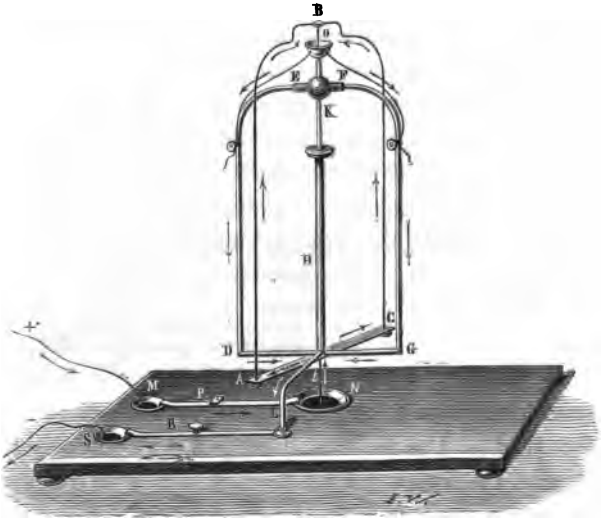


Fig. 154.

d'une coupe métallique *o* remplie de mercure. Cet équipage peut tourner autour de l'axe vertical BH; sa partie inférieure AC communique, au moyen de la tige métallique *t*, avec une coupe métallique N pleine de mercure et incrustée dans une planche de bois sec. L est un support mé-

tallique courbe fixé à la même planche de bois, et qui soutient l'appareil métallique fixe EDGF. En E et en F, les colonnes métalliques sont interrompues et reliées par une tige *isolante* à travers laquelle passe la colonne HK. Cette dernière colonne est métallique dans sa portion H, et *isolante* dans sa portion K. La coupe *o* communique, par des fils métalliques, avec les colonnes *conductrices* ED, FG. Le pied L de l'appareil fixe communique par une bande de cuivre R avec une coupe métallique S pleine de mercure; la coupe N communique aussi, par une bande de cuivre P, avec la coupe M pleine de mercure.

Si nous faisons communiquer la coupe M avec le pôle positif, et la coupe S avec le pôle négatif d'une pile, le courant passera de M en N, pénétrera dans la tige *t*, se bifurquera pour parcourir la portion horizontale et les deux tiges verticales de l'équipage mobile. En B, ce courant passera, par la pointe, dans la coupe *o*, où il se bifurquera de nouveau pour descendre le long des deux colonnes verticales de l'appareil fixe et parcourir sa portion horizontale. Arrivé au pied L de l'appareil fixe, le courant descendra le long de ce pied jusqu'à la bande de cuivre R, d'où il se rendra à la coupe S et au pôle négatif de la pile. Les flèches, qui indiquent la marche du courant dans toutes les parties du circuit, montrent qu'il parcourt, *dans des sens opposés*, les portions correspondantes et parallèles de l'appareil fixe et de l'équipage mobile.

Au moment où le circuit est fermé, l'équipage mobile est repoussé, tourne sur sa pointe autour de l'axe vertical HK, et vient s'arrêter dans un plan perpendiculaire à celui de l'appareil fixe.

2° Pour démontrer la seconde partie de la proposition, on modifie l'appareil comme l'indique la figure 155. La colonne médiane H est tout entière métallique, et entourée d'un fil de cuivre recouvert d'une enveloppe isolante de soie. Ce fil est, ainsi, isolé de la colonne H ; sa partie infé-

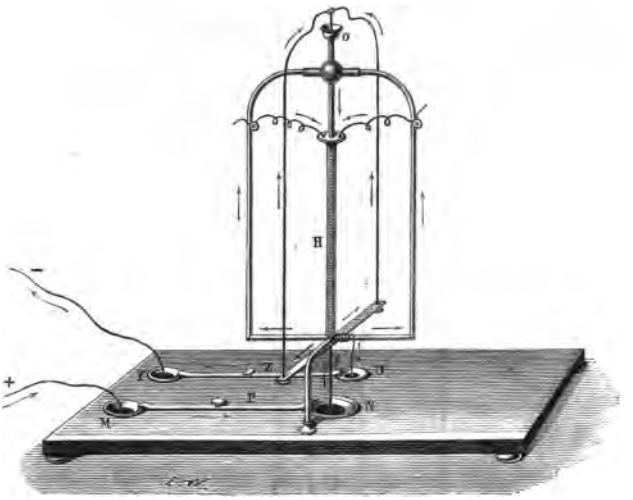


Fig. 155.

rieure plonge dans la coupe U pleine de mercure, et sa partie supérieure se bifurque pour communiquer avec les tiges verticales de l'appareil fixe. Quand on met la coupe M en communication avec le pôle positif, et la coupe Y avec le pôle négatif de la pile, le courant parcourt le système tout entier ; les flèches indiquent que le sens de sa marche est *le même* dans les portions correspondantes et parallèles de l'appareil fixe et de l'équipage mobile.

Au moment où le circuit est fermé, l'équipage mobile est attiré, tourne sur sa pointe autour de l'axe vertical H, et vient s'arrêter dans le plan de l'appareil fixe.

2e proposition. — Un courant *sinueux* produit le même effet qu'un courant *rectiligne* de même intensité et de même longueur en projection, pourvu que la distance à laquelle les actions s'exercent soit très grande par rapport à l'amplitude des sinuosités.

La colonne H (Fig. 156) est complétement métallique. Un fil métallique entouré de soie communique avec l'extrémité

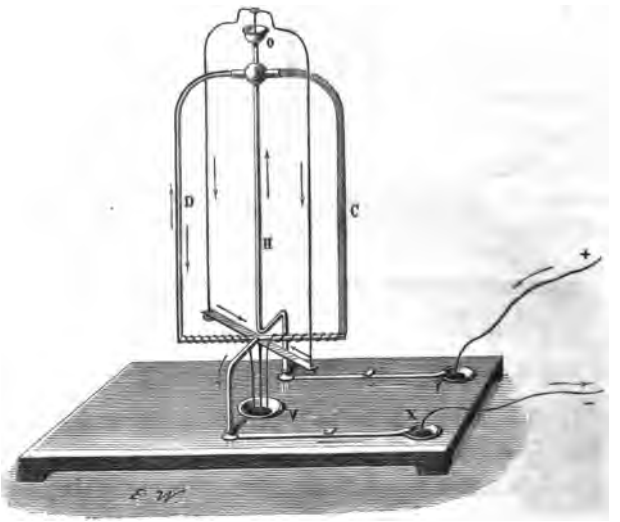


Fig. 156.

supérieure de la colonne D, s'applique sur elle dans toute sa longueur et sur la moitié de la partie horizontale correspondante de l'appareil fixe, et vient plonger dans la

coupe V pleine de mercure. Un autre fil métallique, enfouré de soie aussi, communique avec la portion supérieure de la colonne C, est contournée en spirales serrées autour de la moitié correspondante de l'appareil fixe, et vient plonger, par sa partie inférieure, dans la même coupe V. L'équipage mobile a la même disposition que dans les deux expériences précédentes, et communique inférieurement avec la coupe V. Quand les pôles de la pile sont en communication avec les coupes X et Y, le système tout entier est traversé par un courant. La portion D de l'appareil fixe est parcourue par deux courants *rectilignes* de même intensité, de même longueur et de sens inverses; son action sur la partie correspondante de l'équipage mobile est nécessairement *nulle*. La portion C de l'appareil fixe est parcourue par un courant *rectiligne* et par un courant *sinueux* de même intensité, de même longueur en projection et de sens inverses. Si l'action d'un courant *sinueux* est *la même* que celle d'un courant *rectiligne*, l'influence de cette portion C de l'appareil fixe sur la portion correspondante de l'équipage mobile doit donc aussi être *nulle*. Dès lors l'appareil mobile doit rester en repos dans sa position primitive.

Avant de fermer le circuit, on oriente l'équipage mobile de telle manière que son plan fasse un angle de 25 à 30 degrés avec celui de l'appareil fixe, puis on fait passer le courant. L'expérience démontre que l'équipage mobile n'est ni attiré ni repoussé, et reste en repos dans sa position primitive.

3e proposition.—Deux courants non parallèles s'attirent, quand ils se rapprochent ou s'éloignent ensemble de *leur*

point de croisement; ils se repoussent, quand l'un s'éloigne tandis que l'autre s'approche de *leur point de croisement.*

Dans le cas où les courants ne sont pas contenus dans un même plan, et par suite ne peuvent pas se rencontrer, le *point de croisement* est un point quelconque pris sur la droite qui mesure leur plus courte distance.

Soient M, N (Fig. 157), deux rigoles pleines de mercure, taillées dans une pièce de bois et séparées par deux cloisons *isolantes* F,E. *cd* est une aiguille métallique *fixe* dont les

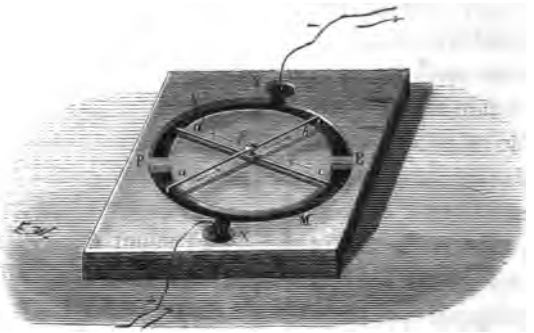


Fig. 157.

extrémités recourbées plongent dans le mercure des rigoles; *ab* est une aiguille semblable, placée un peu au-dessus et *isolée* de la précédente, très mobile autour de son centre sur un pivot *p*, et dont les extrémités recourbées plongent aussi dans le mercure. X et Y sont mis en communication avec les pôles d'une pile. Le courant traverse le mercure et les aiguilles dans le sens des flèches.

Au moment où le circuit est fermé, l'aiguille *ab* tourne autour de son centre ; *a* marche vers *c*, et *b* vers *d*. Ce mouve-

ment continue jusqu'à ce que l'aiguille mobile *ab* soit dans le plan vertical de l'aiguille fixe *cd*. Évidemment alors les deux courants sont parallèles et de même sens. Cette position finale des aiguilles prouve que, conformément à la proposition énoncée, l'action réciproque des courants est *attractive* dans les angles *apc*, *dpb*, c'est-à-dire dans les portions du circuit où ils se *rapprochent* ou *s'éloignent ensemble de leur point de croisement*, et que cette action est *répulsive* dans les angles *apd*, *cpb*, c'est-à-dire dans les parties du circuit où l'un des courants *s'éloigne du point de croisement*, tandis que l'autre s'en *rapproche*.

4e proposition. — Deux portions d'un même courant se repoussent mutuellement.

M et N (Fig. 158) sont deux rigoles remplies de mercure, taillées dans une pièce de bois et séparées par une

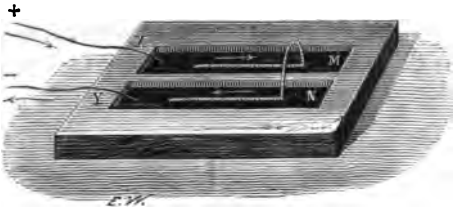


Fig. 158.

cloison isolante. Sur le mercure, on place les deux branches parallèles d'un fil de cuivre recouvert de soie, courbé en arc dans son milieu, et dont les pointes *nues*, un peu recourbées, plongent dans le mercure. On fait d'ailleurs communiquer les extrémités X, Y des rigoles avec les pôles d'une pile.

Au moment où le circuit est fermé, l'équipage mobile

glisse sur le mercure et marche des extrémités X, Y, aux extrémités M, N des rigoles. Il faut donc qu'il y ait répulsion entre les portions du même courant qui traversent successivement le mercure et le fil de cuivre. Cependant, quand on considère que, dans cette expérience, le courant passe d'abord d'un liquide à un fil solide, et puis du fil au liquide, on est en droit d'élever quelques doutes sur sa valeur démonstrative. Toutes les fois, en effet, qu'un courant change de conducteur, la surface de séparation des milieux traversés devient le siége de phénomènes très complexes.

De ces quatre propositions fondamentales, il est facile de déduire toutes les actions que les courants fixes exercent sur les courants mobiles.

A. **Action des courants indéfinis fixes sur les courants finis mobiles.** — Il faut ici distinguer deux cas :

1° *Le courant fini peut se mouvoir parallèlement à lui-même.* — Si le courant fini *ab* marche vers le courant indéfini XY (Fig. 159), il est attiré par toute la portion X*c*

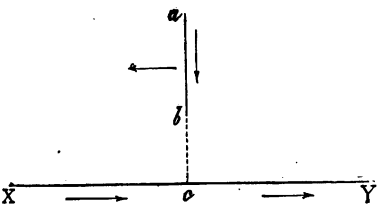


Fig. 159.

du courant indéfini, et repoussé par toute la portion *c*Y de ce courant. Le courant fini *ab* est donc sollicité par une force perpendiculaire à sa direction qui l'emporte,

parallèlement à lui-même, dans *un sens contraire* à celui du courant indéfini XY.

Si le courant fini *ab* s'éloigne du courant indéfini XY (Fig. 160), le même raisonnement indique que le courant

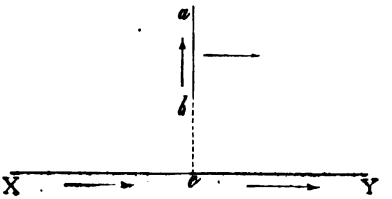


Fig. 160.

mobile *ab* doit être sollicité par une force perpendiculaire à sa direction, qui l'emporte, parallèlement à lui-même, *dans le sens* du courant fixe XY.

2° *Le courant fini peut tourner autour d'une de ses extrémités, a.* — Si le courant fini, *ab*, marche vers le courant indéfini XY (Fig. 161), il est attiré par la portion X*c* et

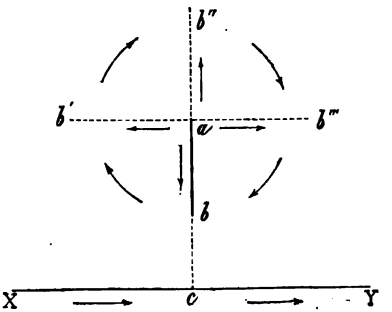


Fig. 161.

repoussé par la portion *c*Y de ce dernier courant. Le courant fini tourne alors autour de *a* dans la direction

des flèches, de manière à prendre la position ab'. Alors il est parallèle au courant indéfini et de sens inverse; il est donc repoussé vers la position ab''. Arrivé en ab'', il est repoussé par la portion Xc, et attiré par la portion cY du courant indéfini, il continue à se mouvoir dans la même direction et atteint la position ab'''. Ici, enfin, il est parallèle au courant indéfini et dirigé dans le même sens; il est donc attiré et continue son mouvement jusqu'à ce qu'il ait repris sa position primitive. Un pareil courant doit donc tourner continuellement autour du point fixe a, dans la direction indiquée par les flèches.

Si le courant fini, ab, s'éloigne (Fig. 162) du courant indéfini XY, il tourne, comme dans le cas précédent, au-

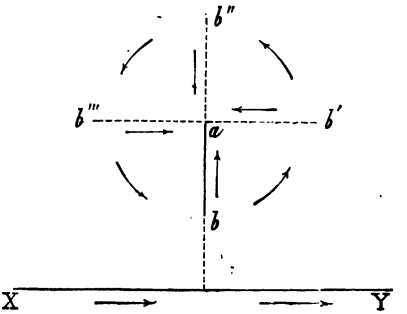


Fig. 162.

tour du point fixe a; seulement, il est facile de voir que son mouvement de rotation doit être dirigé dans un sens opposé.

Tous ces faits peuvent facilement être démontrés par l'expérience, en substituant un courant circulaire fixe au courant rectiligne indéfini XY.

Les coupes M, N, incrustées dans une planche de bois bien sec (Fig. 163), communiquent avec les extrémités *a*, *c* d'un fil de cuivre enveloppé de soie. Ce fil isolé est en-

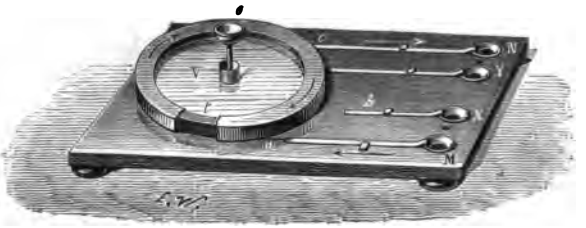


Fig. 163.

roulé plusieurs fois autour d'un cadre circulaire de bois logé, lui-même, dans l'espace circonscrit par les bords recourbés d'un vase de cuivre V. Dans la figure 163, une interruption pratiquée, en *t*, dans les bords du vase, laisse voir le cadre de bois et le fil enroulé; une coupe de l'appareil représentée dans la figure 166 laisse voir, en *q*, *q'*, la coupe du cadre de bois et de l'ensemble des fils enroulés. Au centre du vase V, et complétement isolée de lui, s'élève une colonne métallique surmontée d'une coupe métallique *o*. La coupe Y communique directement avec les bords du vase V. La coupe X, au moyen d'un ruban métallique qui, en *d*, traverse la planche de bois, communique avec la colonne du centre et la coupe métallique *o*. La figure 166 montre cette communication de la coupe X avec l'écrou sur lequel se visse le bout inférieur de la colonne centrale. Le vase V est rempli d'eau légèrement aiguisée avec de l'acide sulfurique, et toutes les coupes sont remplies de mercure. Avec les petits ponts métal-

liques S et R (Fig. 164), on peut, à volonté, établir la communication de la coupe N avec la coupe X ou avec la coupe Y.

Fig. 164.

1° Au centre de l'appareil, fixons une grande colonne P (Fig. 165), et, sur cette colonne, plaçons l'équipage mobile *geifh*, qui, par ses extrémités *g*, *h*, plonge dans le liquide acidulé du vase V.

Si, le pont S étant en place, on fait communiquer la coupe M avec le pôle positif, et la coupe Y avec le pôle

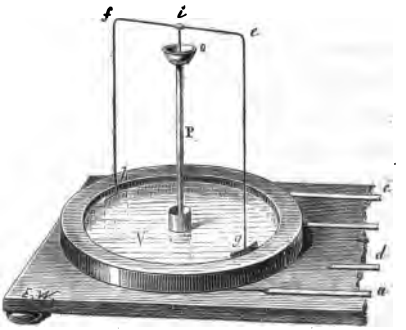


Fig. 165.

négatif d'une pile, le fil circulaire fixe de l'appareil donne passage à un courant dirigé dans le sens indiqué par les flèches de la figure 163 ; en même temps les branches verticales de l'équipage mobile sont parcourues par des courants *descendants*, c'est-à-dire dirigés vers le courant

circulaire fixe. Dans ce cas, l'équipage tourne autour de la pointe *i*, et le *sens de sa rotation est inverse de celui du courant circulaire.*

Si, le pont R étant en place, on fait communiquer la coupe M avec le pôle positif, et la coupe X avec le pôle négatif d'une pile, le sens du courant circulaire fixe est le même; mais, dans les branches verticales de l'équipage mobile, le courant est *ascendant*, c'est-à-dire s'éloigne du courant circulaire fixe. Dans ce cas encore, l'équipage mobile tourne sur la pointe *i*, mais le *sens de sa rotation est le même que celui du courant circulaire.*

2° Après avoir retiré la grande colonne P, on met à sa place la petite colonne K (Fig. 166) et son équipage mo-

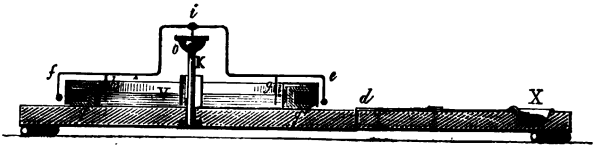


Fig. 166.

bile *ef*. Dans ce cas, l'équipage mobile est composé d'un fil métallique horizontal, bien équilibré et muni, près de ses extrémités, de deux petits prolongements *g*, *h* qui plongent dans le liquide du vase V. En se servant alternativement des ponts S et R, et en établissant convenablement les communications des coupes avec les pôles d'une pile, on peut, comme dans le cas précédent, conserver au courant circulaire fixe la même direction, tandis que le fil horizontal *ef* est traversé par des courants qui tantôt marchent de la pointe *i* à ses extrémités, et tantôt sont dirigés de ses extrémités à la pointe *i*. L'équi-

page mobile tourne dans les deux cas autour de sa pointe.

Quand les courants, dans le fil, vont de la pointe *i* aux extrémités *e*, *f*, c'est-à-dire se rapprochent du courant circulaire fixe, le *sens de la rotation de l'équipage mobile est inverse de celui du courant circulaire.*

Quand les courants, dans le fil, vont des extrémités *e*, *f*, à la pointe *i*, c'est-à-dire s'éloignent du courant circulaire fixe, le *sens de la rotation de l'équipage mobile est le même que celui du courant circulaire.*

B. **Réaction des courants rectilignes fixes sur les courants circulaires mobiles.** Il résulte des principes précédemment exposés que, si un courant circulaire fermé mobile est soumis à l'influence de courants fixes *extérieurs* et perpendiculaires à sa circonférence, le courant circulaire doit tourner sur son centre. Dans le cas où les

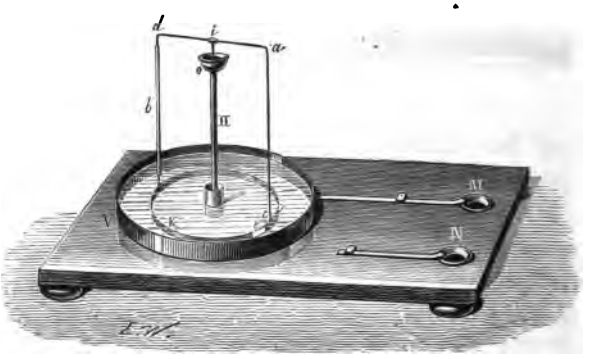


Fig. 167.

courants fixes s'éloignent du courant mobile, le sens du courant circulaire et celui de sa rotation sont *inverses*.

Dans le cas où les courants fixes se rapprochent du courant mobile, le sens du courant circulaire et celui de sa rotation sont les *mêmes*.

On doit à Savary une disposition très ingénieuse qui permet de réaliser ces deux cas, et de vérifier ces deux déductions des principes précédemment exposés. V est un vase de cuivre rempli d'eau acidulée (Fig. 167). En son centre, se trouve une colonne métallique H isolée du vase. Cette colonne, au moyen d'une coupe métallique, sert de support à un petit équipage mobile représenté à part dans les figures 168 et 169. Le vase V communique avec la coupe M, et la colonne H avec la coupe N. L'équipage mobile qui, par sa pointe *i*, repose sur le fond de la coupe de la colonne, est disposé ainsi qu'il suit : Un fil métallique recourbé en *a* est fixé, par une extrémité *d*, à une tige isolante *b*, et, par l'autre extrémité *c*, à un ruban de cuivre circulaire K qui plonge dans le liquide du vase V. Ce ruban de cuivre K est interrompu, en *e*, par une lame isolante d'ivoire.

L'équipage mobile étant en place, si la coupe N communique avec le pôle positif, et la coupe M avec le pôle négatif d'une pile, le courant (Fig. 168) entre dans l'équipage mobile par la pointe *i*, parcourt le fil *iac* et le ruban circulaire K dans le sens des flèches, s'échappe de toutes parts dans le liquide environnant sous forme de courants *linéaires divergents* pour aller au pourtour du vase, et de là au pôle négatif M. — L'équipage mobile tourne, alors, dans le sens de la flèche extérieure L, c'est-à-dire *dans un sens contraire* à celui du courant dans le ruban circulaire K.

Si, au contraire, la coupe M communique avec le pôle positif, et la coupe N avec le pôle négatif, tout se passe comme l'indique la fig. 169; les courants linéaires fixes

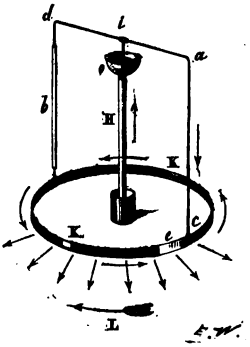


Fig. 168.

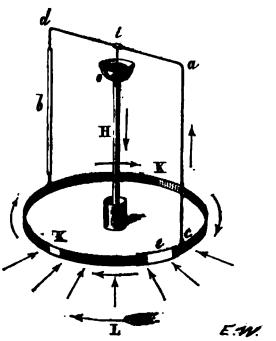


Fig 169.

sont *convergents*, et *le sens de la rotation* de l'équipage mobile, indiqué par la flèche extérieure L, est *le même* que celui du courant dans le ruban circulaire K.

C. **Action d'un courant rectiligne indéfini, fixe, sur un courant mobile fermé.** — Soit XY (Fig. 170) un courant horizontal fixe, et indéfini. Au-dessus de ce courant suspendons un circuit métallique, rectangulaire *acdefgcb*, mobile sur ses extrémités *a*, *b* autour d'un axe vertical *c*L. D'ailleurs, à leur point de croisement *c*, les fils métalliques sont bien isolés. Un courant qui pénétrerait par la pointe inférieure *a*, parcourrait l'équipage mobile dans le sens indiqué par les flèches, et sortirait par la pointe supérieure *b*.

Sous l'influence du courant XY, le courant descendant *de* est entraîné vers X, et le courant ascendant *fg*

vers Y; quant au courant horizontal inférieur *ef*, il tend à devenir parallèle au courant XY, et de même sens que lui. Ces trois actions sont évidemment concordantes pour faire tourner l'équipage autour de *c*L dans le sens indi-

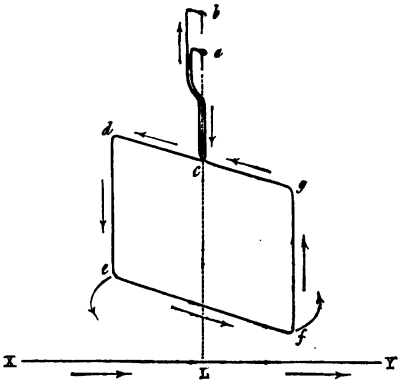


Fig. 170.

qué par les flèches placées en *e* et en *f*. L'action du courant fixe XY sur le courant horizontal supérieur *gd* tend, il est vrai, à faire tourner l'équipage en sens inverse; mais les trois premières actions l'emportent sur cette dernière, et le mouvement s'exécute dans le sens correspondant aux influences exercées sur la portion horizontale inférieure et sur les deux portions verticales du circuit mobile qui, après quelques oscillations, se fixe dans le plan vertical passant par XY.

Ainsi donc, quand un courant horizontal rectiligne, fixe, indéfini, agit sur un courant rectangulaire, fermé, mobile autour de son axe vertical de figure, le courant mobile est *dirigé* et s'arrête dans une position d'équilibre

stable. Dans cette position de l'équipage mobile, le courant *descendant de*, et le courant *ascendant fg*, sont placés, par rapport à l'axe de rotation, le premier du côté par lequel le courant fixe XY arrive, le second du côté par lequel le courant fixe s'en va, tandis que le courant horizontal inférieur *ef* est parallèle au courant fixe XY et de même sens que lui.

L'appareil représenté figure 171 peut servir à vérifier

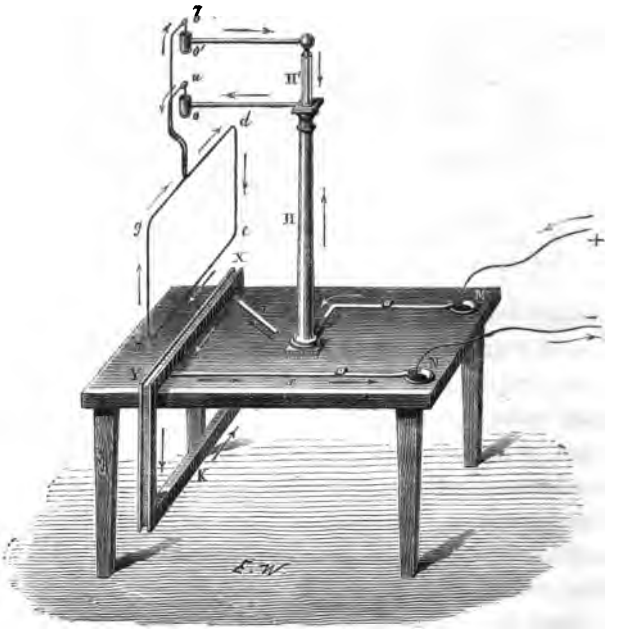


Fig. 171.

l'exactitude de la proposition précédente. H est une colonne métallique creuse qui, par sa partie inférieure, commu-

nique avec la coupe M et porte, à sa partie supérieure, une tige métallique horizontale terminée par une coupe *o*. H′ est aussi une colonne métallique, complétement isolée de H dans toute son étendue, au moyen d'un tube de verre interposé. A sa partie supérieure, cette colonne H′ porte une tige métallique horizontale terminée par une coupe *o′* ; par son extrémité inférieure, elle communique, au moyen d'une lame de cuivre *r*, avec l'extrémité X d'un ruban métallique entouré de soie et enroulé autour du cadre de bois K. L'autre extrémité Y du ruban métallique communique avec la coupe N, au moyen d'une lame de cuivre *s*.

L'équipage mobile rectangulaire P (Fig. 172) étant suspendu par ses pointes *a*, *b* aux coupes *o*, *o′*, on fait communiquer la coupe M avec le pôle positif, et la coupe N avec le pôle négatif d'une pile. Le courant monte le long de la colonne extérieure H, pénètre dans l'équipage mobile par sa pointe inférieure *a*, le parcourt dans le sens indiqué par les flèches, sort par la pointe supérieure *b*, descend le long de la colonne intérieure H′, se rend à l'extrémité X du ruban métallique enroulé sur le cadre K, parcourt ce ruban dans toute son étendue, sort par son extrémité Y, et vient enfin aboutir à la coupe N.

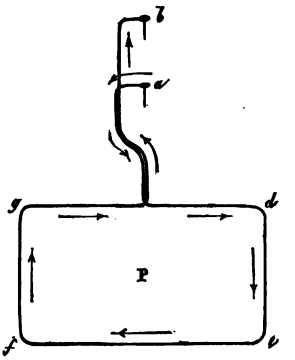


Fig. 172.

Du moment que le circuit est fermé, l'équipage mobile P tourne sur son axe vertical de figure et s'arrête,

après quelques oscillations, dans le plan vertical du courant fixe XY; alors, conformément à ce que nous avons dit dans la proposition précédente, *de* courant descendant est du côté de X, *fg* courant ascendant est du côté de Y, et, par conséquent, le courant horizontal inférieur *ef* marche dans le même sens que le courant fixe X Y.

En place de l'équipage rectangulaire, on peut mettre l'équipage circulaire T (Fig. 173). Ce courant circulaire est *dirigé* comme le précédent, et se place dans le plan vertical du courant fixe; alors le courant descendant *d* est du côté de X, *g* courant ascendant est du côté de Y, et le courant inférieur *e* marche dans le même sens que le courant fixe XY.

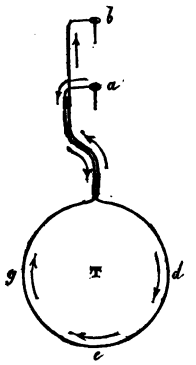


Fig. 173.

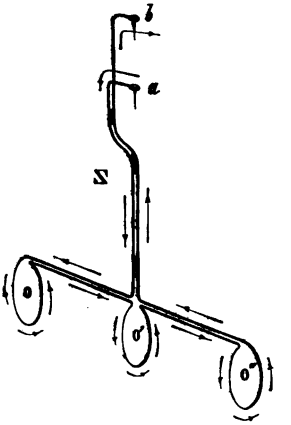


Fig. 174.

Prenons un fil de cuivre entouré de soie et contournons-le sur lui-même comme l'indique la figure 174, nous

aurons ainsi un équipage mobile Z, composé de trois parties circulaires perpendiculaires à un axe horizontal. Nous pouvons suspendre ce petit équipage mobile Z à l'appareil fixe de la figure 171. L'arête horizontale de l'équipage Z, étant traversée par deux courants égaux et de sens inverses, n'est nullement influencée par le courant fixe XY. Toute l'action de ce courant porte donc sur les trois courants circulaires O, O′, O″ de même sens et placés dans des plans verticaux parallèles. Chacun des trois cercles O, O′, O″, tend à s'orienter de telle manière que, dans sa partie inférieure, le courant soit parallèle à XY et de même sens que lui. Dans la position d'équilibre stable de l'équipage Z, l'axe horizontal est donc perpendiculaire à XY, le cercle O″ du côté de la colonne H et le cercle O du côté opposé (1).

D. **Action d'un courant rectiligne fixe sur un solénoïde.** — Ampère a donné le nom de *solénoïde* à un système de courants fermés, égaux, circulaires et de même sens, dont les centres sont placés sur une ligne quelconque à laquelle leurs plans sont perpendiculaires. Le cas le plus simple est celui dans lequel les centres sont sur une ligne droite; l'ensemble des courants parallèles forme alors un cylindre.

Pour construire un *solénoïde*, ou cylindre électro-dynamique, on prend un fil de cuivre entouré d'une et de deux enveloppes isolantes de soie, et on le contourne sur

(1) Dans l'appareil Z et dans les quatre appareils suivants qui représentent des *solénoïdes*, chaque tour de spire du fil se compose d'une ligne *forte* et d'une ligne *faible*. La ligne *forte* indique la portion du tour de spire située en avant du plan de la figure.

lui-même, ainsi que l'indiquent les figures 175 et 176. Supposons qu'un courant entre par la pointe *a* et sorte par la pointe *b*, l'arête horizontale du cylindre est parcourue par deux courants parallèles, égaux et de sens inverses, qui se neutralisent mutuellement; le système se conduit donc comme s'il ne se composait que de l'ensemble des courants circulaires qui sont tous fermés, parallèles et de même sens. Il faut distinguer, d'ailleurs, deux espèces de solénoïdes. — Lorsque (Fig. 175) le fil, au moment où il est

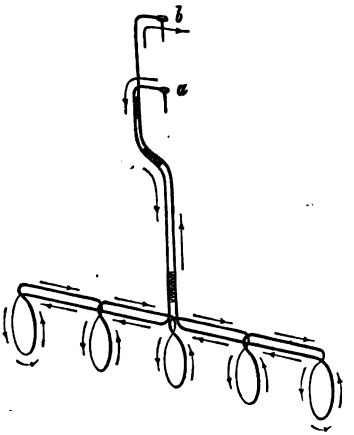


Fig. 175.

plié pour former la partie circulaire, est enroulé de droite à gauche, le cylindre électro-dynamique prend le nom de solénoïde *sinistrorsum*. — Lorsque (Fig. 176) le fil, au moment où il est plié pour former la partie circulaire, est enroulé de gauche à droite, le cylindre électro-dynamique prend le nom de solénoïde *dextrorsum*. Cela posé,

voyons quelle est la position d'équilibre que prend un solénoïde soumis à l'action d'un courant rectiligne, fixe, indéfini.

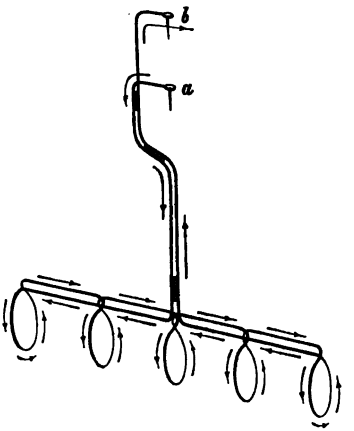


Fig. 176.

Soit MN (Fig. 177) un solénoïde *sinistrorsum* soumis à l'influence du courant fixe XY. Le courant pénètre dans le fil par la pointe *a*, se rend à l'extrémité M, parcourt l'ensemble des circuits circulaires, et vient sortir par la pointe *b*. En réalité, le courant *entre* dans le *solénoïde* par l'extrémité M, et en *sort* par l'extrémité N. Évidemment pour que l'équipage soit en équilibre, l'axe du cylindre doit être perpendiculaire au courant fixe XY, et, dans la partie inférieure du cylindre, tous les courants circulaires doivent être de même sens que le courant fixe. Les extrémités M, N, du solénoïde doivent donc avoir, par rapport au courant fixe XY, la position représentée dans la

figure 177. Pour vérifier ce fait, il suffit de suspendre le solénoïde aux coupes o, o', de l'appareil représenté figure 171.

Représentons le courant XY par un homme couché sur le fil conducteur dans une position telle que

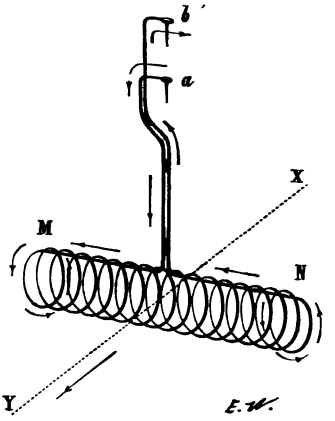


Fig. 177.

ses pieds soient tournés vers le pôle positif X et sa tête vers le pôle négatif Y. Le courant XY, par conséquent, entre dans le corps de cet homme par les *pieds* et en sort par la tête. Imaginons en outre que cet homme ait toujours *la face tournée vers l'axe du solénoïde*, et prenons sa *gauche* et sa *droite* pour la *gauche* et la *droite* du courant. Cela posé, nous pouvons dire que :

Un solénoïde *sinistrorsum* soumis à l'action d'un courant rectiligne fixe est *dirigé*. Lorsque ce solénoïde *sinistrorsum* a atteint sa position d'équilibre stable, son axe est en *croix* avec le courant fixe XY, et son extrémité M,

par laquelle *entre* le courant, est à la *gauche* du courant fixe XY.

Soit MN (Fig. 178) un solénoïde *dextrorsum* soumis à l'influence du courant fixe XY. Le courant pénètre toujours

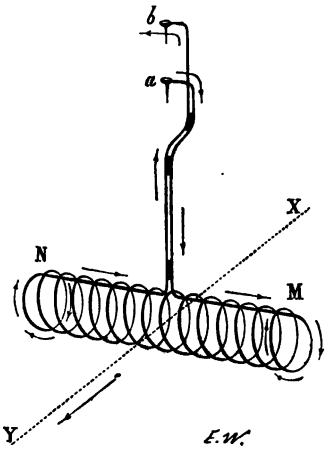


Fig. 178.

dans le fil par la pointe *a*, se rend à l'extrémité M, parcourt l'ensemble des circuits circulaires, arrive à l'extrémité N, et vient sortir en *b*. En réalité, dans ce cas comme dans le précédent, le courant *entre* dans le *solénoïde* par l'extrémité M, et en *sort* par l'extrémité N. Pour que, dans la partie inférieure du cylindre, les courants circulaires marchent dans le même sens que le courant fixe XY, le solénoïde *dextrorsum* doit prendre la position représentée dans la figure 178. L'expérience démontre que, dans cette position, le solénoïde est un équilibre stable. En adoptant

toujours la même manière de représenter le courant fixe, nous pouvons donc dire que :

Un solénoïde *dextrorsum*, soumis à l'action d'un courant rectiligne fixe, est *dirigé*. Lorsque ce solénoïde *dextrorsum* a atteint sa position d'équilibre stable, son axe est en *croix* avec le courant fixe XY, et son extrémité M, par laquelle *entre* le courant, est à la *droite* du courant fixe XY.

En résumé, tout *solénoïde* est *dirigé* par un courant rectiligne et tend à se mettre en *croix* avec lui; dans le cas d'un solénoïde *sinistrorsum*, l'extrémité par laquelle le courant *entre* se place à la *gauche* du courant fixe ; dans le cas d'un solénoïde *dextrorsum*, c'est l'extrémité par laquelle le courant *sort* qui se place à la *gauche* du courant fixe.

ARTICLE II.

ACTION DES COURANTS SUR LES BARREAUX AIMANTÉS.

Pour simplifier l'exposition des faits, nous continuerons à représenter le courant par un homme couché sur le fil conducteur dans une position telle que le courant le parcoure des pieds à la tête, et que sa face soit *toujours* tournée vers l'axe de l'aiguille aimantée. Nous prendrons alors la *gauche* et la *droite* de cet homme pour la gauche et la droite du courant. L'expérience démontre que :

Lorsqu'un courant rectiligne passe dans le voisinage d'une aiguille aimantée, l'aiguille est *déviée* de sa position d'équilibre dans le plan du méridien magnétique, et tend à se mettre *en croix* avec le courant, le *pôle austral à gauche*.

Pour vérifier l'exactitude de cette proposition fondamentale, faisons successivement agir un courant rectiligne fixe sur une aiguille de déclinaison, et sur une aiguille d'inclinaison.

Action du courant sur l'aiguille de déclinaison. — Faisons passer un courant électrique dans un fil horizontal XY situé dans le plan du méridien magnétique, *au-dessus* d'une aiguille de déclinaison (Fig. 179). — Lorsque

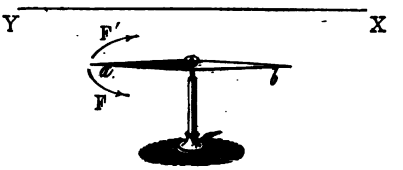


Fig. 179.

l'électricité marche, dans le fil, de X en Y, du *sud* au *nord*, la *gauche* du courant est à l'*ouest*, l'aiguille tourne dans un plan horizontal, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F, et vient se fixer à l'*ouest*, ou à la *gauche* du courant. — Lorsque l'électricité marche, dans le fil, de Y en X, du *nord* au *sud*, la *gauche* du courant est à l'est; l'aiguille tourne dans un plan horizontal, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F', et vient se fixer à l'*est*, ou à la *gauche* du courant.

Laissons toujours le fil XY dans le plan du méridien magnétique, mais plaçons-le *au-dessous* de l'aiguille (Fig. 180). — Quand l'électricité marche, dans le fil, de X en Y, du *sud* au *nord*, la *gauche* du courant est à l'*est*; l'aiguille tourne dans un plan horizontal, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F, et vient se fixer à l'*est*,

ou à la *gauche* du courant. — Quand, au contraire, l'électricité marche, dans le fil, de Y en X, du *nord* au *sud*,

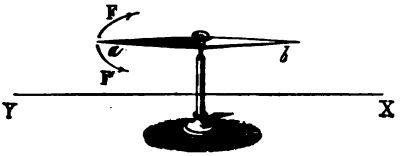


Fig. 180.

le mouvement de l'aiguille change avec la position de la *gauche* du courant, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F', et vient se fixer à l'*ouest*, ou à la *gauche* du courant.

Faisons maintenant passer le courant dans un fil vertical disposé, dans le plan du méridien magnétique, en face du pôle *austral* d'une aiguille de déclinaison (Fig. 181). — Quand l'électricité marche, dans le fil, de X en Y, de *bas en haut*, la *gauche* du courant est à l'*est*; l'aiguille tourne dans un plan horizontal, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F, et vient se fixer à l'*est*, ou à la *gauche* du courant. — Quand l'électricité marche, dans le fil, de Y en X, de *haut en bas*, la *gauche* du courant passe à l'*ouest*, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F', et vient se fixer à l'*ouest*, ou à la *gauche* du courant.

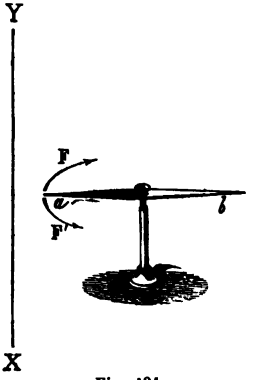


Fig. 181.

Plaçons le fil vertical en face du pôle *boréal* de l'aiguille (Fig. 182). — Si le courant est *ascendant*, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F, et vient se fixer à l'*ouest*, ou à la *gauche* du courant. — Si le courant est *descendant*, le mouvement du pôle *austral* change de sens et s'exécute suivant la flèche F'; ce pôle *austral* vient donc se fixer à l'*est*, mais toujours à la *gauche* du courant.

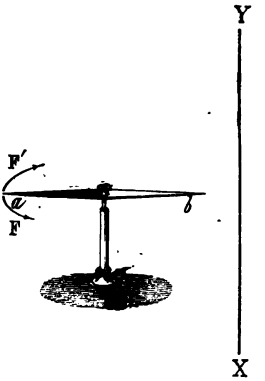


Fig 182.

Action du courant sur l'aiguille d'inclinaison. — Pour étudier cette action, faisons passer un courant dans un fil métallique XY, parallèle au plan du méridien magnétique et à l'aiguille d'inclinaison.

Supposons d'abord que le fil XY soit à l'*ouest* de l'aiguille (Fig. 183), en avant du plan de la figure. — Si le courant marche, dans le fil, de X en Y, l'aiguille tourne sur ses tourillons, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F, plonge vers la terre, et vient se fixer à la *gauche* du courant. — Si le courant marche, dans le fil, de Y

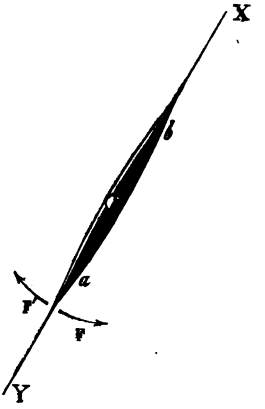


Fig. 183.

en X, le déplacement de l'aiguille est renversé, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F′, s'éloigne du sol, et se fixe toujours à la *gauche* du courant.

Sans rien changer à la disposition de l'expérience, transportons le fil XY à l'*est* de l'aiguille (Fig. 184), en arrière du plan de figure. L'aiguille tourne toujours sur ses tourillons, et tend à se mettre en croix avec le courant. — Si l'électricité marche, dans le fil, de X en Y, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F, s'éloigne du sol, et se fixe à la *gauche* du courant. — Si, au contraire, l'électricité marche, dans le fil, de Y en X, le pôle *austral* se meut suivant la flèche F′, plonge vers la terre, et se fixe toujours à la *gauche* du courant.

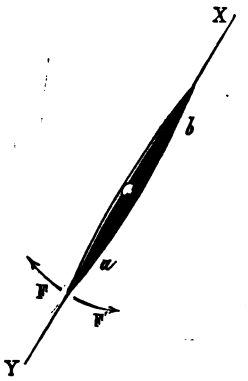


Fig. 184.

Plaçons maintenant le fil XY perpendiculairement au plan du méridien magnétique, en face d'un des pôles de l'aiguille de déclinaison.

Supposons d'abord que le fil soit en face du pôle *austral* (Fig. 185). — Si l'électricité marche, dans le fil, de X en Y, de l'*est* à l'*ouest*, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F, s'éloigne du sol, et se fixe à la *gauche* du courant. — Si l'électricité marche, dans le fil, de Y en X, de l'*ouest* à l'*est*, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F′, plonge vers la terre, et se fixe à la *gauche* du courant.

Enfin, sans rien changer à la disposition générale de l'expérience, transportons le fil XY en face du pôle

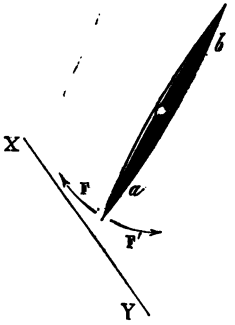


Fig. 185.

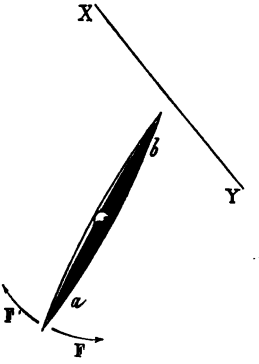


Fig. 186.

boréal (Fig. 186). Dans ce cas encore, l'aiguille tourne sur ses tourillons et le pôle *austral* se porte à la *gauche* du courant. L'expérience montre, en effet, que si l'électricité marche, dans le fil, de X en Y, de l'*est* à l'*ouest*, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F, et plonge vers la terre, tandis que si l'électricité marche, dans le fil, de Y en X, de l'*ouest* à l'*est*, le pôle *austral* se meut dans le sens de la flèche F', et s'éloigne du sol.

Le courant voltaïque exerce donc une action sur une aiguille aimantée placée dans son voisinage; sous l'influence de cette force, l'axe de l'aiguille tend à se mettre *en croix* avec le courant, le *pôle austral à gauche.*

Cette action du courant sur l'aiguille aimantée s'exerce, d'ailleurs, dans toutes les directions, et à travers toutes les substances qui ne sont pas magnétiques. Ajoutons qu'un

barreau de fer *doux*, dans lequel les deux fluides magnétiques ne sont pas séparés, n'est pas *dirigé* par un courant électrique parallèle à son axe; ce fait prouve que le courant exerce sur les deux fluides magnétiques des influences égales et de signes contraires.

M. Colladon a démontré le premier (1) que les décharges fournies par les appareils à électricité statique produisent, sur l'aiguille aimantée, le même effet que les courants voltaïques. Ces faits rapprochés de beaucoup d'autres dont nous avons déjà parlé, ou que nous rappellerons plus tard, tendent à démontrer que les propriétés des courants électriques sont complétement indépendantes de leur origine.

Lois de l'action du courant sur l'aiguille aimantée. — MM. Biot et Savart (2) ont déterminé expérimentalement les lois de l'action d'un courant sur un barreau aimanté. A cet effet, ils ont pris (Fig. 187) un aimant prismatique très court M, suspendu horizontalement à un fil sans torsion, et rendu *astatique*, ou indifférent à l'action de la terre, par un fort barreau aimanté placé convenablement dans le voisinage. L'aimant étant placé dans une cage de verre, on approchait un fil vertical N de 3 à 4 mètres de longueur. Quand le courant passait par le fil, l'aimant était *dirigé* et s'arrêtait dans une position telle que son axe était per-

Fig. 187.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1826, t. XXXIII, p. 62.
(2) *Ibid.*, 2e série, 1820, t. XV, p. 222.

pendiculaire à la plus courte distance du fil N au centre de suspension de l'aimant. En raison de la longueur du fil N et des petites dimensions de l'aimant M, le courant vertical pouvait être considéré comme indéfini. Quand l'aimant était écarté de sa position d'équilibre, il oscillait comme un pendule autour de son centre de suspension, et exécutait des oscillations isochrones dont le nombre dépendait de l'intensité de l'action exercée par le courant. En tenant compte dans chaque expérience du nombre des oscillations exécutées dans un temps donné, et de la distance de l'aimant au fil N ; en s'appuyant, d'ailleurs, sur le principe de la proportionnalité des forces accélératrices et des carrés des nombres des oscillations, ces deux physiciens trouvèrent que :

Pour des distances comprises entre 15 et 120 millimètres, l'action d'un courant indéfini sur un aimant est en raison inverse de la *simple* distance.

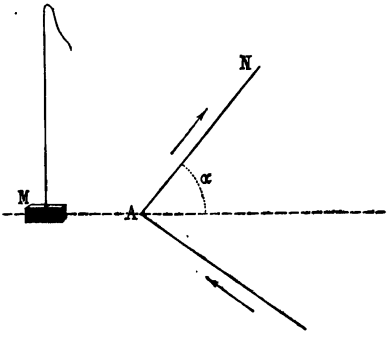


Fig. 188.

MM. Biot et Savart substituèrent au conducteur rectiligne un conducteur plié en angle (Fig. 188). L'aimant

fut disposé en face de l'angle A, de manière que son centre se trouvât sur l'horizontale qui coupait cet angle en deux parties égales. Opérant comme dans le cas précédent, ils trouvèrent que :

L'action d'un courant indéfini sur un aimant est proportionnelle à la tangente de la moitié de l'angle α que le courant fait avec cette ligne horizontale.

Laplace, appliquant le calcul aux deux lois expérimentales de MM. Biot et Savart, démontra que :

L'action d'un *élément* de courant *ab* sur une particule magnétique M (Fig. 189) est une force perpendiculaire

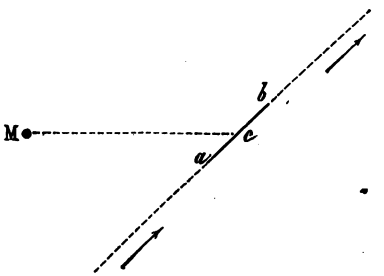


Fig. 189.

au plan qui passe par M et *ab*, inversement proportionnelle au carré de la distance M*c* du point M au milieu *c* de l'élément *ab*, et directement proportionnelle au sinus de l'angle M*ca* que fait la direction du courant avec la ligne M*c* qui joint la particule magnétique au centre de l'élément *ab*.

C'est la loi de l'action *élémentaire* d'un courant sur un aimant ; il est facile d'en vérifier l'exactitude, en démon-

trant qu'elle conduit aux deux lois précédentes relatives à l'action *totale* d'un courant indéfini. Il résulte de cette discussion que, si un courant rectiligne indéfini et un aimant sont en présence, chaque pôle de l'aimant est sollicité par une force perpendiculaire au plan qui passe par ce pôle et par la direction du courant, et dont l'intensité varie en raison inverse de la simple distance. Ces forces, d'ailleurs, sont dirigées de telle façon que le pôle austral est poussé vers la *gauche* et le pôle boréal vers la *droite* du courant.

Cette dernière définition de l'action d'un courant rectiligne sur un aimant permet de prévoir les mouvements de rotation que doit exécuter, et les positions d'équilibre stable que doit prendre une aiguille aimantée soumise à l'influence d'un courant voltaïque. Elle fournit aussi une explication complète des attractions et des répulsions que, dans certaines positions, les courants exercent sur les aiguilles. Quelles que soient leurs complications et leurs irrégularités apparentes, ces derniers phénomènes, observés successivement par MM. Pouillet et Boisgiraud, ne sont que des conséquences directes des lois de MM. Biot et Savart, et peuvent facilement être déduits de la définition de l'action d'un courant sur un barreau aimanté.

Comparaison du solénoïde et du barreau aimanté. — De ce que nous avons dit, page 330, il résulte qu'un *solénoïde* s'oriente par rapport à un courant indéfini comme un barreau aimanté : dans le solénoïde *sinistrorsum*, c'est l'extrémité par laquelle *entre* le courant qui se porte à *gauche*, et joue le rôle du *pôle austral* du barreau aimanté ; dans le solénoïde *dextrorsum*, c'est au contraire

l'extrémité par laquelle *sort* le courant qui se porte à *gauche*, et joue le rôle du *pôle austral* d'un aimant.

Aux extrémités d'un solénoïde librement suspendu, présentons les extrémités d'un autre solénoïde de *même espèce*. Il y aura *répulsion*, si les deux extrémités rapprochées sont celles par lesquelles le courant *entre*, ou celles par lesquelles il *sort ;* il y aura au contraire *attraction*, si l'une des extrémités en présence est celle par laquelle le courant *entre*, tandis que l'autre extrémité est celle par laquelle il *sort*.

Aux extrémités d'un solénoïde *sinistrorsum* librement suspendu, présentons successivement les pôles d'un aimant. Le pôle *austral* du barreau *repousse* l'extrémité du solénoïde par laquelle le courant *entre*, et *attire* l'extrémité par laquelle le courant *sort*. Le pôle *boréal* du barreau *attire* l'extrémité du solénoïde par laquelle le courant *entre*, et *repousse* l'extrémité par laquelle le courant *sort*.

Présentons, de même, les pôles d'un aimant aux extrémités d'un solénoïde *dextrorsum* librement suspendu. Le pôle *austral attire* l'extrémité du solénoïde par laquelle le courant *entre*, et repousse l'extrémité par laquelle le courant *sort*. Le pôle *boréal repousse* l'extrémité du solénoïde par laquelle le courant *entre*, et *attire* l'extrémité par laquelle le courant *sort*.

Abandonnons un solénoïde librement suspendu à l'action de la terre; l'appareil tourne sur ses pointes de suspension, jusqu'à ce que son axe soit dans le plan du méridien magnétique. — Dans cette position d'équilibre stable, si le solénoïde est *sinistrorsum*, l'extrémité tournée vers le *nord* est celle par laquelle le courant *entre ;* si le

solénoïde est *dextrorsum*, l'extrémité tournée vers le *nord* est celle par laquelle le courant *sort*.

Enfin, plongeons les extrémités d'un solénoïde dans la limaille de fer ; les particules métalliques restent adhérentes à ses extrémités tant que le courant passe, et se détachent au moment où le courant est interrompu.

Indépendamment de toute idée théorique, ces faits, fournis directement par l'expérience, démontrent qu'en toute circonstance, un solénoïde se conduit comme un aimant, et que les extrémités du cylindre électro-dynamique jouent le rôle des pôles d'un barreau. Le *pôle austral* du solénoïde *sinistrorsum* est l'extrémité par laquelle le courant *entre ;* le *pôle austral* d'un solénoïde *dextrorsum* est l'extrémité par laquelle le courant *sort*. Plus généralement, on peut dire que :

Le *pôle austral* d'un solénoïde quelconque est l'extrémité qui, regardée en face, présente un courant circulaire dont la partie descendante est à *gauche*, la partie ascendante à *droite*, et dont la partie *inférieure* est dirigée de la *gauche* à la *droite* de l'observateur.

Pour épuiser la comparaison entre le solénoïde et le barreau aimanté, il n'y a plus qu'à chercher quelle est l'action d'un *élément courant* sur les extrémités d'un solénoïde, et quelle est l'action réciproque de deux solénoïdes en présence. Ampère a abordé et résolu cette double question dans son admirable travail sur la théorie des phénomènes électro-dynamiques ; il résulte de ses beaux calculs, que :

1° L'action exercée par un *élément* de courant sur un solénoïde se réduit à deux forces perpendiculaires aux

plans qui passent par l'*élément* et les extrémités du solénoïde : ces forces sont en raison inverse des carrés des distances, et en raison directe des sinus des angles d'inclinaison de l'*élément* sur les lignes qui vont de son centre aux extrémités du solénoïde. C'est rigoureusement la loi de Laplace pour l'action d'un *élément courant* sur les pôles d'un aimant.

2° L'action réciproque *totale* de deux solénoïdes placés à des distances qui ne sont pas très petites se réduit à un système de quatre forces, deux attractives et deux répulsives, agissant dans la direction des lignes qui joignent deux à deux leurs extrémités : ces forces varient en raison inverse des carrés des distances. C'est encore la loi qui régit l'action mutuelle de deux aimants.

ARTICLE III.

THÉORIE DU MAGNÉTISME.

Avant de pousser plus loin cette étude des phénomènes électro-dynamiques, il nous paraît nécessaire d'exposer les idées émises par Ampère sur la constitution des aimants. La théorie nouvelle du magnétisme proposée par ce grand physicien peut être considérée comme une conséquence des faits précédents ; elle ne donne pas seulement une explication simple et facile de tous les phénomènes connus, elle a encore le grand avantage de faire rentrer les actions des aimants naturels et artificiels, et celles de l'aimant terrestre lui-même dans les lois de l'électricité dynamique.

Pour lui, les fluides magnétiques n'existent pas, les propriétés des aimants sont dues à des courants électriques qui circulent autour de leurs particules. Ces courants existent dans tous les corps influencés par l'action magnétique. Dans les substances magnétiques à l'état neutre, les courants particulaires n'ont pas tous la même orientation; dirigés au hasard dans tous les azimuts, ils se neutralisent mutuellement, et ne peuvent révéler leur présence par aucun effet extérieur appréciable. Pour qu'un corps magnétique soit aimanté, il faut et il suffit que, sous une influence quelconque, les courants particulaires soient tous ramenés à marcher dans le même sens et dans des plans parallèles. Dans un barreau aimanté, chaque série linéaire de molécules représente un petit solénoïde dont l'axe est parallèle à l'axe du barreau ; le barreau tout entier est un faisceau de solénoïdes parallèles. Mais, dans chaque section transversale du barreau, les courants particulaires agissent comme un seul courant égal à leur résultante, et perpendiculaire à l'axe. L'ensemble de toutes ces *résultantes* constitue une série de courants circulaires parallèles et de même sens ; le barreau aimanté est donc un véritable solénoïde.

Cependant il existe une différence importante entre un solénoïde et un aimant. Dans le solénoïde, les pôles sont situés aux *extrémités* du cylindre ; dans l'aimant, au contraire, les pôles sont toujours situés dans son intérieur et à une certaine distance de ses extrémités. Ampère explique cette différence, en disant que, dans un barreau aimanté, les courants particulaires réagissent les uns sur les autres. Par suite de cette action réciproque, les

plans des courants d'un même aimant ne restent pas perpendiculaires à son axe, mais prennent une position d'autant plus inclinée sur cet axe qu'ils en sont plus éloignés, et qu'ils s'écartent davantage de son milieu. Les conséquences de cette obliquité des courants particulaires sont évidentes. D'abord, les centres d'action, ou *pôles*, ne peuvent plus être situés aux extrémités de l'aimant, mais doivent se rapprocher de son centre d'une fraction de sa longueur d'autant plus grande que les courants ainsi inclinés sont plus nombreux, et que leur inclinaison est plus forte. En second lieu, conformément aux résultats de l'expérience, plus l'épaisseur de l'aimant est considérable par rapport à sa longueur, plus les pôles doivent se rapprocher de son centre. Dans un solénoïde, au contraire, par le fait de sa construction, les courants restent tous parallèles et perpendiculaires à l'axe; par suite, les *pôles*, ou centres d'action, doivent être situés exactement aux *extrémités*.

L'hypothèse d'Ampère conduit nécessairement à la conclusion suivante :

Un corps magnétique de forme cylindrique ou prismatique sera aimanté toutes les fois que son axe sera en croix avec la direction d'un courant électrique.

Aimantation par courants. — Arago (1) a constaté le premier qu'il suffit de plonger dans la limaille de fer un fil métallique quelconque traversé par un courant, pour que les petits fragments métalliques restent adhérents au fil, et donnent des signes d'aimantation tant que le courant

(1) *Ann. de chim et de phys.*, 2e série, 1820, t. XV, p. 93.

dure. Aussitôt que le courant cesse, la limaille se détache du fil, et ne conserve plus aucune trace d'aimantation. Ses observations ont aussi prouvé que des aiguilles de fer doux placées en croix avec un conducteur quelconque sont aimantées tant que le courant passe, et retombent à l'état neutre au moment où le courant est interrompu. Des aiguilles d'acier trempé placées dans les mêmes circonstances s'aimantent, et leur aimantation persiste après que le courant a cessé d'agir. Cette différence entre le fer doux et l'acier est un effet de la *force coercitive*. Sous l'influence du courant électrique extérieur, les courants particulaires du fer doux sont orientés; mais, quand la force directrice cesse d'agir, rien ne retient plus ces courants particulaires dans une position déterminée, leur orientation disparaît, et avec elle toute trace d'aimantation. Dans l'acier trempé, au contraire, du moment que les courants ont été ramenés au parallélisme, la force coercitive suffit seule pour les retenir dans cette position, et l'aimantation persiste même après que le courant extérieur a cessé d'agir. Ajoutons d'ailleurs que, dans tous ces cas de magnétisme développé par un courant, le pôle austral de l'aimant est situé à la gauche du courant extérieur.

Dans le même mémoire, Arago annonça que l'aiguille n'est *jamais* magnétisée quand elle est maintenue parallèle à un fil parfaitement droit parcouru par un courant électrique. La polarité de l'aiguille ne commence à se prononcer que quand son axe est incliné sur la direction du courant.

Pour rendre plus énergique l'action du courant sur l'aiguille, Arago conseilla de la placer dans l'axe d'un cylindre

de verre autour duquel un fil métallique traversé par un courant est enroulé en hélice. Ici, en effet, chaque tour de l'hélice représente un courant perpendiculaire à l'axe de l'aiguille, et les actions de tous ces courants extérieurs sont concordantes pour ramener au parallélisme les courants

Fig. 190.

Fig. 191.

particulaires de l'aiguille. — D'ailleurs, si l'hélice est *sinistrorsum* (Fig. 190), le pôle *austral* de l'aimant intérieur est à l'extrémité par laquelle le courant *entre*, c'est-à-dire à la *gauche* de la direction du courant extérieur dans chaque tour de l'hélice. — Quand, au contraire, l'hélice est *dextrorsum* (Fig. 191), le pôle *austral* de l'aimant intérieur est à l'extrémité par laquelle le courant *sort*.

Dès lors, il est facile de comprendre ce qui arrive lorsqu'un fil métallique est contourné sur lui-même

Fig. 192.

de manière à représenter (Fig. 192) une série d'hélices alternativement *sinistrorsum* et *dextrorsum*, et qu'une longue aiguille d'acier trempé est placée dans l'axe commun de

ces hélices. Après l'interruption du courant, on trouve que chaque hélice a aimanté la portion correspondante de l'aiguille, comme si elle avait agi seule; en sorte que l'aiguille est composée d'une série d'aimants partiels, placés bout à bout, qui se regardent par leurs pôles de même nom. Tous ces faits sont autant de confirmations de la théorie du magnétisme proposée par Ampère; ils ont tous été découverts par Arago, qui les publia dans le mémoire déjà cité.

Dans la séance du 6 novembre 1820, Arago (1) annonça verbalement à l'Académie des sciences qu'il avait produit, à l'aide des décharges des appareils à l'électricité statique, tous les phénomènes d'aimantation qu'il avait déjà obtenus en se servant de l'électricité voltaïque. Savary (2) publia, plus tard, une étude très belle et très détaillée de tous ces phénomènes. Le flux d'électricité fourni par une machine électrique suffit pour aimanter une aiguille placée perpendiculairement au fil conducteur, surtout quand la décharge se fait par une série de petites étincelles. Une aiguille d'acier s'aimante quand on la place dans une hélice qui, par ses extrémités, établit une communication entre les conducteurs et les coussinets d'une machine électrique, ou entre les deux armures d'une bouteille de Leyde. Il résulte du travail de Savary que, dans les cas où l'on agit avec une décharge d'électricité statique, la longueur et le diamètre du fil conducteur, la force coercitive des aiguilles et leur épaisseur, la distance du fil

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1820, t. XV, p. 323.
(2) *Ibid.*, 2e série, 1827, t. XXXIV, p. 5.

conducteur aux aiguilles elles-mêmes exercent, sur l'intensité et même sur le sens de l'aimantation communiquée, des influences dont les lois ne sont pas encore bien connues.

La partie la plus intéressante du travail de Savary est celle dans laquelle il cherche à apprécier l'influence d'enveloppes diverses placées entre les aiguilles d'acier et les courants soit voltaïques, soit de décharge. Les enveloppes de bois, de verre, ou de toute autre substance *isolante*, n'exercent aucune action sur l'aimantation communiquée; il n'en est pas de même des enveloppes *conductrices*. Un cylindre de cuivre assez épais, placé entre l'aiguille et l'hélice, peut arrêter complétement l'action du courant; il suffit de diminuer l'épaisseur du cylindre pour que l'aimantation devienne sensible, et, pour une épaisseur peu considérable de l'enveloppe conductrice, l'aiguille peut être aimantée plus fortement que si l'enveloppe n'y était pas. Le fer, l'argent, l'étain et le mercure, exercent des influences analogues. Des couches concentriques et alternatives de substances métalliques et de substances isolantes agissent comme si les premières étaient seules. Les enveloppes formées avec des couches épaisses de limaille fine de cuivre, ou de fer, n'exercent aucune influence sur l'aimantation communiquée. Comme nous le verrons plus tard dans le chapitre consacré à l'étude de l'induction électrodynamique, tous ces faits trouvent leur explication naturelle dans l'action inductrice que la décharge électrique exerce, au moment de son passage, sur les diverses enveloppes employées.

Électro-aimants. — L'influence des courants électriques sur le fer doux a été mise à profit pour construire

des aimants temporaires connus sous le nom d'*électro-aimants*. La figure 193 représente un de ces électro-aimants, dans lequel le barreau de fer doux est disposé en fer à cheval.

C est un gros barreau de fer doux, fixé à un bâti de bois au moyen d'un collier de cuivre. Autour des extré-

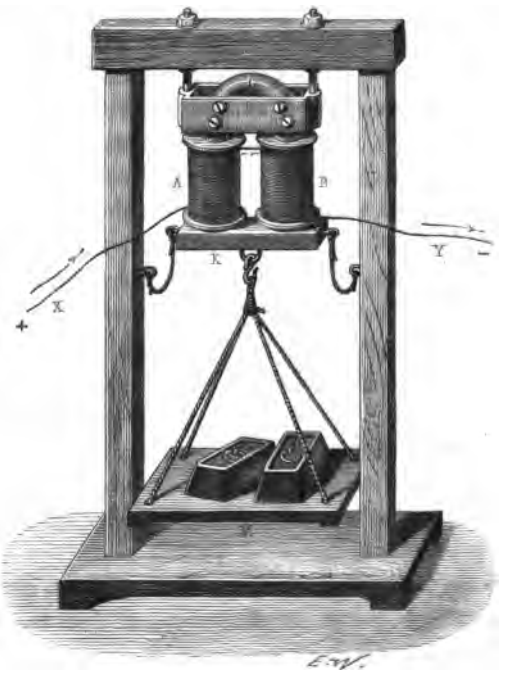


Fig. 193.

mités du fer à cheval, on enroule un grand nombre de fois un fil de cuivre très long et recouvert d'une enveloppe iso-

lante de soie. Dans l'exemple actuel, les deux bobines qui garnissent les bouts du fer doux, si elles étaient superposées par leurs extrémités supérieures, formeraient une hélice *sinistrorsum*. Par conséquent, si X est mis en communication avec le pôle positif et Y avec le pôle négatif d'une pile, tant que le courant passe, l'extrémité A du fer à cheval est un pôle austral, et l'extrémité B un pôle boréal. Il suffit, d'ailleurs, d'interrompre le courant pour que le fer doux retombe immédiatement à l'état neutre. K est une grosse pièce de fer doux, qui adhère fortement aux extrémités du fer à cheval quand le courant passe, et s'en détache aussitôt que le courant est interrompu. A la pièce de fer K on peut suspendre un plateau de bois M, sur lequel on place des poids connus. La charge que l'électro-aimant peut ainsi soutenir, ou sa puissance, dépend de la grosseur du fer à cheval, de la longueur et de la grosseur du fil enroulé autour de ses extrémités, et du nombre des couples de la pile. L'électro-aimant de la Faculté des sciences de Paris peut supporter une charge qui dépasse 1000 kilogrammes, quand le courant est fourni par une pile de vingt-quatre couples; sa puissance est de beaucoup supérieure à celle de tous les aimants *permanents*, naturels ou artificiels, connus.

Nous aurons souvent occasion de revenir sur ces électro-aimants; ils jouent un rôle important dans un grand nombre d'appareils électromoteurs.

Rotation des aimants sous l'influence des courants. — La théorie d'Ampère permet d'expliquer très simplement deux phénomènes curieux de rotation que présentent les aimants soumis à l'influence d'un courant

électrique. Le premier cas de rotation a été découvert par M. Faraday, et le second par Ampère lui-même.

Premier cas. — Dans une large éprouvette de verre remplie de mercure (Fig. 194), on plonge un barreau

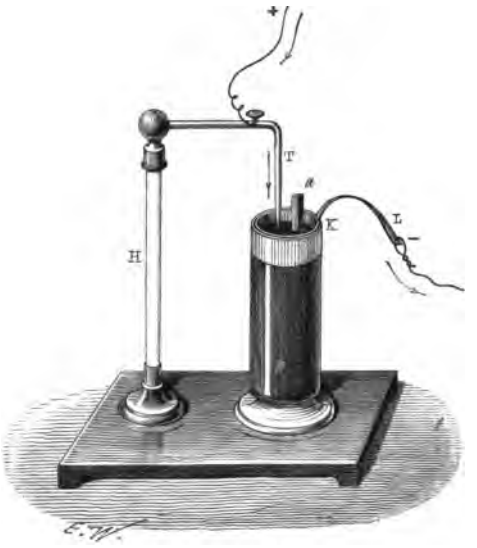


Fig. 194.

aimanté lesté, à sa partie inférieure, par un contre-poids *p* de platine, le pôle austral *a* du barreau fait saillie au-dessus du mercure. K est un anneau métallique qui plonge dans le mercure et communique, au moyen de la lame métallique L, avec le pôle négatif d'une pile. La tige métallique T, supportée par une colonne isolante H, communique avec le pôle positif de la pile, et plonge dans le mercure de l'éprouvette, suivant la direction de son axe de

figure. Au moment où le circuit est fermé, le barreau aimanté se met en mouvement et décrit une circonférence autour du conducteur T. Pour bien comprendre la cause de ce mouvement de translation circulaire ou de révolution de l'aimant, prenons (Fig. 195) une section horizontale de l'appareil.

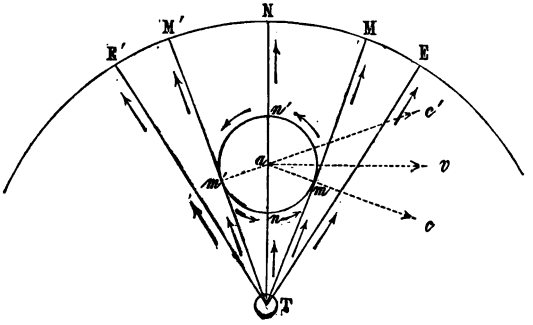


Fig. 195.

T représente la tige métallique qui amène le courant dans le mercure, E'M'NME l'anneau circulaire par lequel les courants sortent du mercure. Le cercle *nmn'm'* est la section de l'aimant, et puisque le pôle austral est en haut, cette section doit être représentée par un courant qui parcourt la circonférence de ce cercle dans le sens des flèches tracées sur la figure. Soient en outre TM, TM', les deux courants qui traversent le mercure tangentiellement à l'aimant ; TE, TE', deux des courants situés hors de ces tangentes ; TN un des courants qui traversent l'aimant lui-même.

Le courant qui marche suivant TM attire toute la demi-circonférence dont la convexité est tournée vers cette

ligne, car de chaque côté du point de contact *m* les courants sont de même sens dans la circonférence et dans la tangente ; le même courant TM repousse l'autre moitié de la circonférence, mais avec une intensité moindre, à cause de la plus grande distance. Au contraire, le courant TM′ repousse toute la moitié la plus rapprochée et attire la moitié la plus éloignée de cette circonférence *mnm′n′*. Ces quatre actions se réduisent à deux forces *égales*, l'une attractive suivant *ac* perpendiculaire sur TM au point de contact *m*, l'autre répulsive suivant *ac′* prolongement de la ligne *am′* perpendiculaire à TM′ au point de contact *m′*. Ces deux forces donnent elles-mêmes une résultante perpendiculaire à TN, appliquée en *a* sur l'axe de l'aimant, et dirigée dans le sens de *av*. Il est évident que chaque groupe de deux courants TE,TE′, placés symétriquement en dehors des tangentes, donne aussi une résultante suivant *av*.

Le courant TN, qui traverse l'aimant et passe par son axe, doit être divisé en trois portions : la première, T*n*, située entre le conducteur T et l'aimant; la seconde, *nn′*, située tout entière dans l'aimant; la troisième, *n′*N, située entre l'aimant et l'anneau métallique. La seconde portion *nn′* est sans effet, parce qu'elle ne peut produire que des attractions et des répulsions réciproques entre les particules de l'aimant, et que de pareilles forces ne peuvent lui imprimer aucune espèce de mouvement ; la première partie T*n* attire *m′n* et repousse *nm* ; la troisième partie *n′*N attire *m′n′* et repousse *mn′* : ces quatre forces donnent donc une résultante appliquée en *a* et dirigée suivant *av*. Les courants qui traversent l'aimant, pris deux

à deux symétriquement par rapport à TN, donnent de même une résultante dirigée suivant *av*.

L'ensemble des courants horizontaux qui traversent le mercure agit donc sur l'aimant de manière à lui imprimer un mouvement de translation dans le sens de *av*; l'axe de cet aimant doit donc décrire autour du conducteur T une circonférence dont T est le centre et T*a* le rayon.

Le courant qui descend le long du conducteur T attire la moitié de l'aimant dont les courants marchent dans la direction *m'n*, et repousse l'autre moitié; il en résulte que le barreau, en même temps qu'il se déplace circulairement autour de l'axe T, a une tendance à tourner sur son axe propre *a*. Ce dernier mouvement est ordinairement complétement détruit par la résistance du mercure, cependant quelquefois on en observe quelques traces dans les expériences.

Dans cette expérience, on peut aussi recouvrir l'aimant d'un vernis à la gomme laque qui l'isole du mercure. La présence de cette couche isolante supprime nécessairement tous les courants qui, tels que TN, traversent l'aimant, pour ne laisser subsister que les courants tangents TM, TM', et tous ceux qui sont placés en dehors de ces derniers. De ce que nous avons dit plus haut il résulte que, dans ce cas, la résultante des actions des courants qui traversent horizontalement le mercure ne change ni de point d'application ni de direction, par conséquent le mouvement de révolution du barreau *a* autour du conducteur T doit rester circulaire et s'effectuer dans le même sens.

Deuxième cas. — Tout étant disposé de la même manière, plaçons (Fig. 196) le barreau aimanté dans l'axe de

l'éprouvette, et faisons plonger le conducteur T dans une coupe métallique remplie de mercure et fixée à l'extrémité

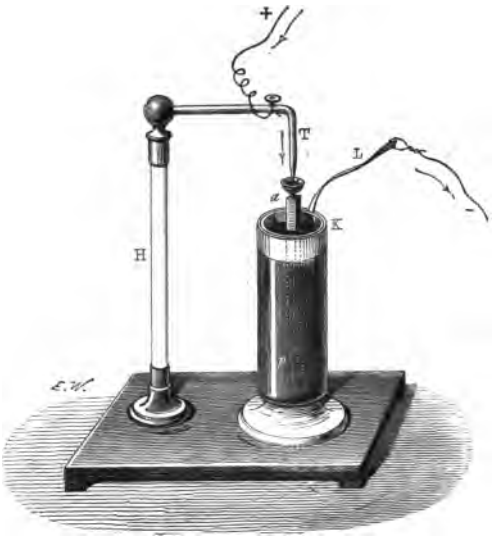


Fig. 196.

de l'aimant. L'axe de l'aimant ne change pas de position, mais le barreau est animé d'un mouvement de rotation autour de cet axe.

En effet, soient T (Fig. 197) la projection du conducteur qui amène l'électricité dans la coupe fixée à l'extrémité du barreau, et $nmn'm'$ la section du barreau aimanté. Tous les courants horizontaux partent du centre T et se dirigent en divergeant vers S, N, S'. Chacun de ces courants doit être divisé en deux portions : la première, Tn, contenue tout entière dans l'aimant lui-

même, et qui ne peut, par conséquent, lui communiquer aucun mouvement; la seconde, nN, située tout entière hors de l'aimant et seule efficace. Or, nN attire mn et

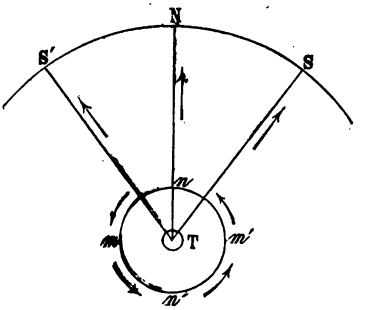


Fig. 197.

repousse nm'; la résultante de ces deux actions tend donc à faire tourner l'aimant sur son axe dans le sens de $mnm'n'$. Toutes les portions extérieures des autres courants horizontaux agissent dans le même sens, et l'aimant tourne autour de son axe dans le sens $mnm'n'$, c'est-à-dire dans un *sens contraire à celui* de ses propres courants particulaires.

Du courant terrestre. — L'hypothèse d'Ampère sur la constitution des aimants conduit naturellement à cette conséquence, que la terre est parcourue, à sa surface ou dans son intérieur, par des courants parallèles à l'équateur magnétique, et qui lui donnent la propriété de se conduire comme un vaste aimant. Dans chaque station, l'action du globe sur l'aiguille aimantée serait celle de la *résultante* de tous ces courants, ou d'un *courant moyen* placé de manière à produire le même effet que l'ensemble de ces courants circulaires. Or, des lois qui régissent la position

d'équilibre d'un barreau librement suspendu et soumis à l'action d'un courant indéfini, il résulte nécessairement que, dans chaque station choisie à la surface de notre hémisphère boréal, ce *courant terrestre moyen* est dirigé de l'*est* à l'*ouest* dans un plan *perpendiculaire* à la direction de l'aiguille d'inclinaison, et doit passer *au-dessous* et au *sud* du point de suspension de cette aiguille. Ampère a imaginé et exécuté une expérience très simple qui permet de vérifier l'exactitude de ces prévisions théoriques.

Avec un gros fil de cuivre (Fig. 198), faisons un rectangle *abcdef* bien équilibré autour de l'axe de rotation *ad*

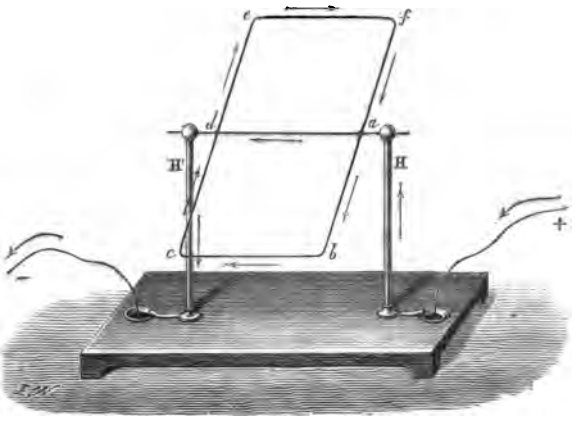


Fig. 198.

dont les extrémités reposent sur deux colonnes métalliques H, H'. Les fils sont bien isolés les uns des autres aux points *a* et *d*, où ils se croisent. Orientons le système de manière que, le plan du rectangle étant perpendiculaire au méridien magnétique du lieu, la colonne H

soit à l'est, et la colonne H′ à l'ouest du centre de figure de ce rectangle. Cela fait, mettons la colonne H en communication avec le pôle positif, et la colonne H′ avec le pôle négatif d'une pile. Dès que le circuit est fermé, le rectangle tourne sur son axe, et se place, ainsi que l'indique la figure, dans une position telle que son plan est perpendiculaire à la direction de l'aiguille d'inclinaison. Or, dans cette situation d'équilibre stable, le courant descendant *fb* est situé à l'est, et le courant ascendant *ce* à l'ouest du centre de figure du rectangle; de plus, le courant horizontal inférieur *bc* est dirigé de l'est à l'ouest. Si, à l'aide des faits précédemment exposés, nous cherchons à déterminer la position et la direction d'un courant électrique capable d'amener et de retenir ce rectangle dans la position d'équilibre qu'il a prise sous l'influence de la terre, nous sommes conduits à cette conclusion que :

Conformément aux indications fournies par la théorie d'Ampère, l'action du globe terrestre, en chaque lieu pris à la surface de notre hémisphère boréal, est la même que celle d'un *courant moyen* dirigé de l'*est* à l'*ouest* dans un plan *perpendiculaire* à la direction de l'aiguille d'inclinaison, et passant *au-dessous* et au *sud* du centre de suspension de cette aiguille.

ARTICLE IV.

RÉACTION DE LA TERRE ET DES AIMANTS SUR LES COURANTS.

Une fois connue l'action directrice exercée par un courant *fixe* sur une aiguille aimantée *mobile*, la réaction de

la terre considérée comme un vaste aimant et d'un barreau aimanté fixe sur un courant *mobile* est facile à prévoir; cette réaction, en effet, est une conséquence nécessaire de ce principe fondamental de mécanique, que toujours l'*action* et la *réaction* sont deux forces égales et directement opposées. Dans les pages qui suivent nous puiserons, dans l'hypothèse d'Ampère sur la constitution des aimants et dans la définition que nous venons de donner de l'action du globe, l'explication des mouvements très variés qu'un barreau fixe et la terre elle-même peuvent imprimer à des conducteurs rectilignes ou à des circuits fermés traversés par des courants. L'exactitude des vues introduites dans la science par ce grand physicien paraîtra plus évidente, quand nous aurons ainsi montré que, dans toutes les circonstances, les résultats de l'expérience sont d'accord avec les prévisions de la théorie des phénomènes électro-dynamiques.

§ Ier. — Action de la terre sur les courants.

Cette action doit être étudiée sur les courants verticaux, sur les courants horizontaux et sur les circuits fermés.

Courants verticaux. — M. Pouillet a le premier (1) bien étudié l'action de la terre sur les courants verticaux mobiles. V, V′ (Fig. 199) sont deux vases circulaires de cuivre remplis d'eau acidulée. H est une colonne de cuivre isolée des vases précédents au moyen du tube creux de verre dans

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1822, t. XXI, p. 77.

lequel elle passe, et munie, à sa partie supérieure, d'une coupe métallique *o* remplie de mercure. T est un levier isolant de bois, bien équilibré, reposant par une pointe

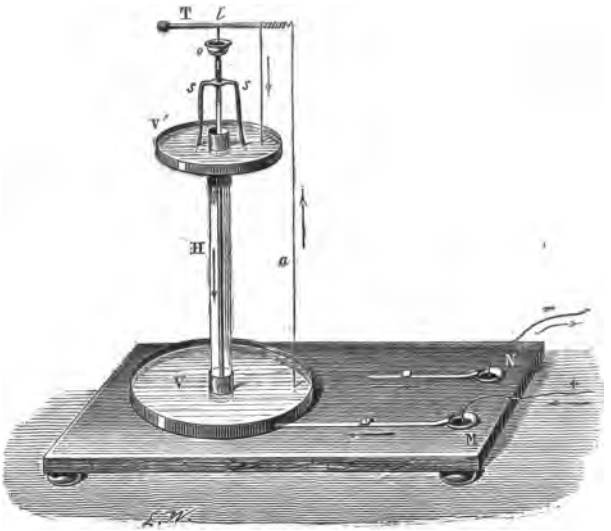


Fig. 199.

métallique *i* sur le fond de la coupe, et portant à une de ses extrémités un fil métallique *a* qui plonge à la fois dans le liquide du vase supérieur V', et dans le liquide du vase inférieur V. D'ailleurs, la colonne H porte une bande recourbée de cuivre *ss* qui plonge dans le liquide du vase supérieur. La coupe M communique avec le vase V, et la coupe N avec la colonne H. Si l'on fait communiquer le pôle positif d'une pile avec la coupe M, et le pôle négatif avec la coupe N, le fil *a* est traversé par un cou-

rant vertical *ascendant*. Au moment où le circuit est fermé, l'équipage mobile entre en mouvement et vient, après quelques oscillations, se fixer dans une position telle que le courant *ascendant a* est à l'*est* de l'axe de rotation H. — Si, ensuite, on fait communiquer le pôle positif de la pile avec la coupe N, et le pôle négatif avec la coupe M, le fil *a* est traversé par un courant *descendant;* l'équipage mobile entre de nouveau en mouvement, et le courant *descendant a* se fixe à l'*ouest* de l'axe de rotation H. L'action de la terre sur un courant vertical est donc purement *directrice* et la même que celle d'un courant horizontal indéfini dirigé de l'est à l'ouest.

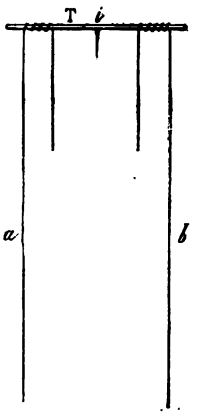


Fig. 200.

Si nous plaçons, sur la colonne H, l'équipage de la figure 200 composé d'un levier isolant T, et de deux fils verticaux *a*, *b*, le courant est toujours de même sens dans les deux fils. Cet équipage doit être *astatique*, ou indifférent à l'action de la terre; l'expérience démontre, en effet, que, sous l'influence du courant terrestre, cet appareil reste en équilibre, quelque position qu'on lui donne.

Courants horizontaux. — Soit (Fig. 201) *ef* un fil métallique horizontal bien équilibré, dirigé de l'est à l'ouest. Par une pointe métallique *i*, ce fil repose sur le fond d'une coupe *o* pleine de mercure portée sur une colonne de

cuivre H, et plonge, au moyen de deux petits appendices, dans le liquide acidulé dont est rempli le vase circulaire de cuivre V. La colonne H communique avec la coupe N, et le vase avec la coupe M. Lorsqu'on fait communiquer le pôle positif d'une pile avec la coupe N, et le pôle négatif avec la coupe M, le fil horizontal *ef* est par-

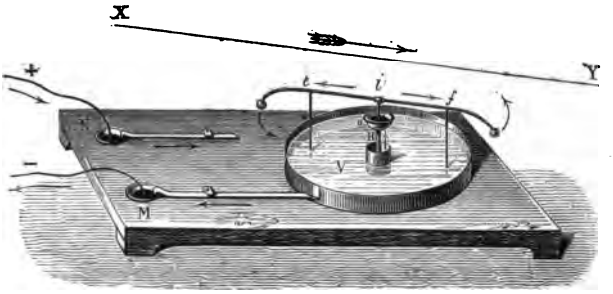


Fig. 201.

couru par deux courants dirigés l'un de *i* en *e*, l'autre de *i* en *f*. Si l'action de la terre peut être représentée par celle d'un courant horizontal indéfini XY, dirigé de l'est à l'ouest, et placé au sud de la colonne H, *ei* doit être repoussé vers le nord, tandis que *fi* est attiré vers le sud. L'équipage mobile doit donc exécuter, autour de la pointe *i*, un mouvement de rotation dont le sens est indiqué par deux flèches appliquées en *e* et en *f*. L'expérience démontre que les choses se passent ainsi.

Si l'on renverse les communications des pôles de la pile avec le vase V et la colonne H, les courants changent de direction dans le fil *ef*, deviennent convergents et marchent l'un de *e* en *i*, l'autre de *f* en *i*; immédiatement,

comme on pouvait le prévoir, le mouvement de rotation de l'équipage mobile change de sens.

Lorsque l'appareil est disposé de manière que le fil *ef* soit parcouru d'une extrémité à l'autre par un même courant, l'équipage mobile est et doit être *astatique*. En effet, dans ce cas, la partie *ie* et la partie *if* du fil sont en même temps toutes deux attirées ou toutes deux repoussées. Mais, quelle que soit l'orientation du fil *ef*, à cause de l'éloignement du courant terrestre, les actions exercées sur *fi* et sur *ei* ont la même intensité ; il est donc évident que ces actions se font équilibre, et ne peuvent imprimer aucun mouvement de rotation au système.

Courants fermés. — Les faits précédents nous permettent de prévoir que la terre doit exercer sur un courant fermé une action purement *directrice*. En effet, soit *defg* (Fig. 202) un équipage rectangulaire, mobile autour de la verticale menée par les pointes *a*, *b* qui servent à le suspendre aux colonnes métalliques H, H'. Si nous faisons communiquer la coupe M avec le pôle positif, et la coupe N avec le pôle négatif d'une pile, l'équipage mobile représente un courant fermé décomposable en quatre courants dont deux sont horizontaux, et deux verticaux ; les courants horizontaux *ef*, *gd*, égaux et de sens contraire, sont, l'un attiré et l'autre repoussé par le courant terrestre. Ces deux actions sont nécessairement d'égale intensité ; elles se neutralisent et ne peuvent communiquer aucun mouvement au système. Mais le courant vertical *descendant de* est entraîné vers l'*est*, tandis que le courant vertical *ascendant fg* est entraîné vers l'*ouest* ; l'équipage mobile doit donc tourner autour de son axe de rotation, et s'ar-

rêter dans un plan vertical perpendiculaire au méridien magnétique. Dans cette position d'équilibre stable, *de* courant vertical *descendant* est à l'*est*, et *fg* courant vertical *ascendant* à l'*ouest* de l'axe de rotation; *ef* courant horizontal inférieur est dirigé de l'*est* à l'*ouest*. L'expérience

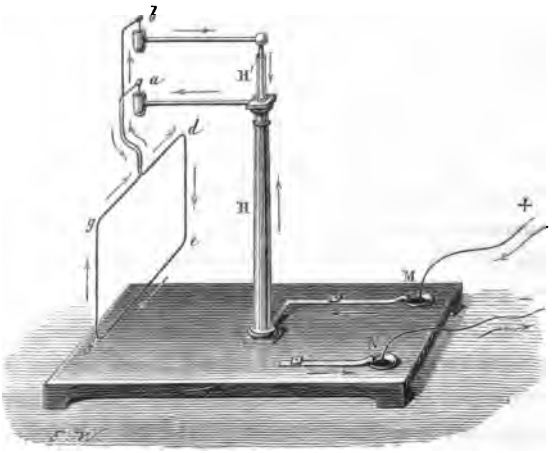


Fig. 202.

démontre que, si l'on change le sens du courant dans le rectangle, l'équipage mobile exécute une demi-révolution. Après quelques oscillations, le rectangle se fixe de nouveau dans le plan perpendiculaire au méridien magnétique, comme c'est nécessaire pour que les courants verticaux et horizontaux restent orientés de la même manière, et conservent leurs mêmes rapports de position et de direction par rapport au courant terrestre.

Le courant circulaire T de la figure 173, mis en place du

courant rectangulaire, serait dirigé de la même manière ; il se fixerait dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, l'électricité marchant de l'*est* à l'*ouest* dans la partie inférieure du circuit.

Il suffit de jeter les yeux sur les circuits fermés P et R (Fig. 203 et 204), pour se convaincre que chacun de ces

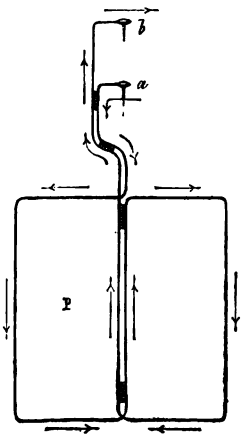


Fig. 203.

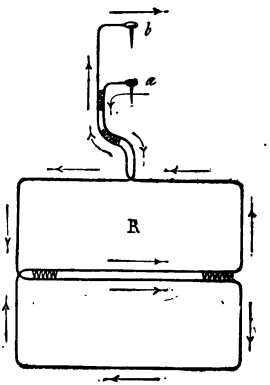


Fig. 204.

équipages mobiles doit être *astatique*, ou indifférent à l'action de la terre. En effet, dans l'appareil P, les courants horizontaux supérieurs et inférieurs tendent à tourner en sens contraires autour de l'axe de rotation, et par conséquent se neutralisent ; quant aux courants verticaux, ceux qui sont sur l'axe ne peuvent pas être mis en mouvement, et les deux autres ne peuvent pas obéir à l'action directrice de la terre, puisqu'ils sont de même sens. — Dans l'appareil R, les quatre courants horizontaux,

divisés en deux groupes égaux et de sens contraires, se neutralisent; il est, en outre, facile de voir que, dans chaque côté vertical du rectangle, les courants sont dirigés de manière que l'action directrice du courant terrestre ne puisse imprimer aucun mouvement au système.

Enfin, à l'appareil fixe de la figure 202 suspendons un des sélénoïdes représentés figures 177 et 178, pour le soumettre à l'action de la terre. Dès que le circuit est fermé, le cylindre électro-dynamique est dirigé comme un aimant; son axe se place dans le plan du méridien magnétique, c'est-à-dire dans une direction perpendiculaire à celle du courant terrestre. D'ailleurs, l'extrémité tournée vers le nord est celle par laquelle le courant *entre* si le solénoïde est *sinistrorsum*, et celle par laquelle il *sort* si le sélénoïde est *dextrorsum*. Ces faits sont la conséquence de ce que nous avons dit plus haut de l'influence exercée

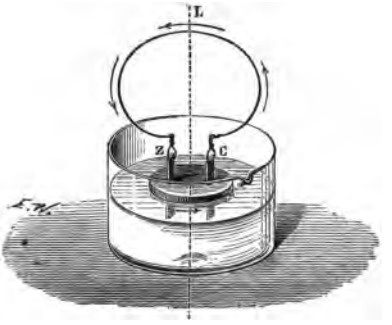


Fig. 205.

par un courant rectiligne indéfini sur un solénoïde, et de la comparaison du solénoïde avec le barreau aimanté.

G. De La Rive a imaginé des appareils très simples et très élégants, pour mettre en évidence l'action directrice exercée par la terre sur les courants fermés. A travers un flotteur de liége très léger (Fig. 205 et 206) on fait passer deux lames métalliques : l'une de zinc Z, l'autre de cuivre C.

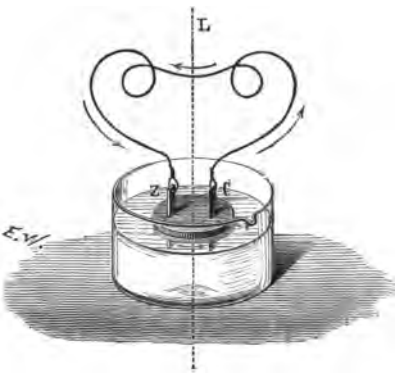


Fig. 206.

Ces deux lames sont réunies par leurs bouts supérieurs au moyen d'un fil de cuivre roide et contourné d'une façon quelconque. On place le flotteur sur de l'eau aiguisée avec de l'acide sulfurique ; il se développe un courant dirigé du zinc au cuivre dans le liquide, et du cuivre au zinc dans le fil conjonctif. Ces petits appareils sont de véritables piles flottantes ; abandonnés à l'action de la terre, ils tournent sur eux-mêmes autour d'un axe vertical L, et, après plusieurs oscillations, ils s'arrêtent dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, et dans une position telle que le zinc Z est à l'*est* et le cuivre C à l'*ouest* de l'axe de rotation. Il est évident que, dans cette situation, toutes

les conditions sont remplies pour que ces piles soient en équilibre stable.

§ II. — Action des aimants sur les courants.

Cette action doit aussi être étudiée sur les courants verticaux, sur les courants horizontaux et sur les courants fermés.

Courants verticaux. — M. Faraday a imaginé un appareil très simple, pour mettre en évidence l'action des

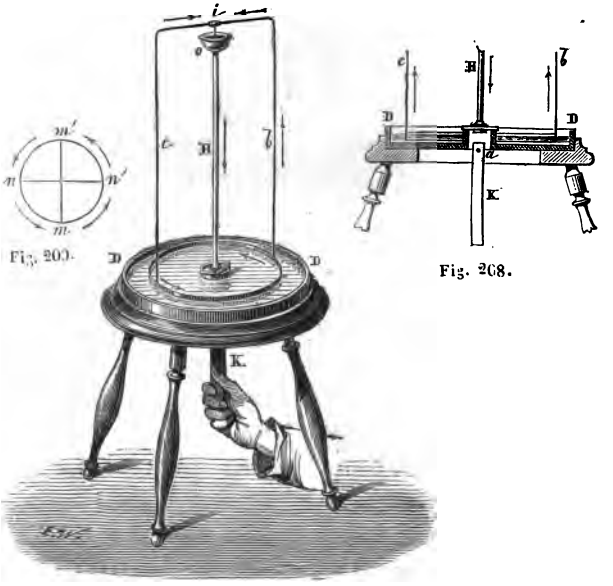


Fig. 206. Fig. 208.

Fig. 207.

pôles d'un aimant sur un courant vertical. DD (Fig. 207 et 208) est une cuvette de zinc remplie d'eau aiguisée

avec de l'acide sulfurique; *cib* est un fil de cuivre mobile autour de la colonne métallique verticale H. Par le fait de l'action de l'acide sulfurique sur le zinc, il se développe un courant électrique qui monte le long des branches *c* et *b* du fil, et redescend par la colonne métallique H. Au moment où l'on introduit le *pôle austral* d'un barreau K entre les fils *c* et *b*, l'équipage entre en mouvement et tourne autour de H dans le sens indiqué par les flèches appliquées aux extrémités inférieures des fils verticaux *c*, *b*. En effet, soient (Fig. 209) *mnm'n'* la section du barreau, et *nn'* le diamètre suivant lequel son extrémité australe est coupée par le plan des fils *b* et *c* au moment où l'aimant est introduit : le courant ascendant *c* est repoussé par *m'n* et attiré par *nm*, le courant ascendant *b* est attiré par *n'm'* et repoussé par *mn'*, les quatre impulsions s'accordent donc pour entraîner l'équipage mobile dans le sens indiqué. Si l'on avait présenté aux fils le *pôle boréal* de l'aimant, l'équipage mobile aurait tourné en sens inverse.

Ampère est parvenu à faire tourner un conducteur rectiligne autour de son axe, en le soumettant à l'influence d'un aimant. Soit M (Fig. 210) un aimant muni d'une pointe d'acier à sa partie inférieure et portant, à sa partie supérieure, une légère excavation remplie de mercure. Cet aimant, fixé à une colonne isolante H, communique, par sa partie supérieure, avec le pôle positif d'une pile. La pointe d'acier plonge dans une coupe remplie de mercure fixée à la partie supérieure d'un cylindre de cuivre B lesté avec un contre-poids de platine *p*, et plongé dans le mercure dont est remplie une éprouvette de verre. Un

anneau métallique K sert à faire communiquer le mercure avec le pôle négatif de la pile. Au moment où le circuit est fermé, la partie du cylindre B extérieure au mercure est parcourue par un courant vertical descendant,

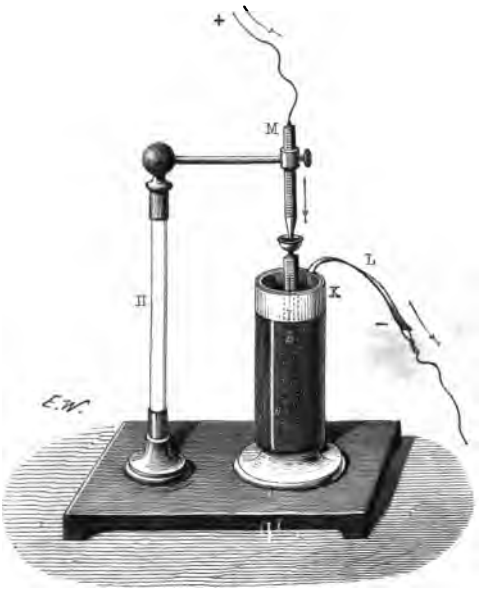


Fig. 210.

le cylindre lui-même tourne autour de son axe, et le sens de sa rotation dépend de la nature du pôle de l'aimant M qui plonge dans la coupe par la pointe d'acier. Ce mouvement de rotation du conducteur B s'explique absolument comme dans le cas précédent, en considérant que ce cylindre ne conduit pas seulement l'électricité suivant *une droite sans épaisseur*, mais doit être assimilé à un

faisceau d'autant de courants verticaux qu'il contient de séries de particules parallèles à son axe.

Courants horizontaux. — Pour étudier l'action des pôles d'un aimant sur un système de courants horizontaux, reprenons l'appareil représenté figure 201 (page 364). L'équipage mobile est traversé par deux courants horizontaux, et tourne sous l'influence de la terre. Plaçons un aimant vertical dans l'axe de rotation du système. Le raisonnement et l'expérience s'accordent pour démontrer que :

1° En présentant le pôle *boréal* d'un aimant *au-dessous* du système, on favorise le mouvement de rotation, et on l'accélère;

2° En présentant le pôle *austral* d'un aimant *au-dessus* de ce même système, on favorise aussi le mouvement de rotation, et on l'accélère;

3° En présentant, au contraire, un pôle *austral au-dessous* ou un pôle *boréal au-dessus*, on contrarie le mouvement de rotation déterminé par l'action de la terre; si l'aimant est assez puissant, on peut, ainsi, arrêter l'appareil et même le faire tourner en sens inverse.

Courants fermés. — Lorsqu'on place un fort barreau aimanté horizontalement au-dessus ou au-dessous d'un circuit voltaïque mobile, rectangulaire ou circulaire, figures 172 et 173, l'appareil est dirigé et se fixe dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'aimant. D'ailleurs, le pôle austral est toujours situé à la gauche du courant horizontal le plus rapproché du barreau. Les piles flottantes de G. De La Rive (Fig. 205 et 206) sont très commodes pour répéter ces expériences. Il est facile de

voir que cette action directrice, exercée par un aimant sur un courant fermé, est d'accord avec la direction des courants circulaires auxquels la théorie d'Ampère rapporte les propriétés des barreaux aimantés.

Action d'un aimant sur le mercure traversé par un courant. — Les actions réciproques des aimants et des courants voltaïques rendent compte des mouvements singuliers que prend une masse de mercure traversée par un courant, quand on la soumet à l'influence du pôle d'un fort barreau aimanté. C'est Davy (1) qui, le premier, a observé ces faits peu de temps après la publication des expériences de M. Faraday sur les rotations électro-magnétiques.

On plonge dans un bain de mercure, perpendiculairement à sa surface, deux fils métalliques en communication avec les pôles d'une pile; le mercure sert à fermer le circuit. Si, alors, on place le pôle d'un fort aimant, soit au-dessus, soit au-dessous des fils, le mercure tourne immédiatement autour de ces fils comme axes, suivant les circonstances ordinaires des rotations électro-magnétiques. Le mouvement de rotation s'accélère considérablement quand les pôles opposés de deux aimants sont symétriquement placés, l'un au-dessus, l'autre au-dessous de la surface du mercure. Mais, si, au lieu de placer ainsi le pôle du barreau sur le prolongement de la perpendiculaire passant par le fil, on rapproche ce pôle de la portion de la surface liquide comprise entre les deux conducteurs, le mouvement circulaire du mercure cesse, il

(1) *Ann de chim. et de phys.*, 2e série, 1824, t. XXV, p. 64.

est remplacé par deux courants *opposés* de liquide, l'un à droite, l'autre à gauche de l'aimant.

A travers le fond d'un vase de verre, et perpendiculairement à ce fond, faisons passer deux fils métalliques en communication avec les pôles d'une pile. Les deux portions des fils contenues dans le vase sont entièrement enveloppées d'un enduit isolant de cire à cacheter, excepté à leurs extrémités qui sont nues et polies. Versons alors assez de mercure dans le vase pour que sa surface se maintienne à 2 ou 3 millimètres au-dessus des extrémités des fils. Dès que le circuit est fermé, le mercure s'élève au-dessus de chacun des conducteurs sous forme de petits cônes d'où s'échappent des ondes métalliques dans toutes les directions ; le seul point sans agitation est celui de la rencontre de ces ondes, au centre de l'espace compris entre les deux fils. Si, alors, on tient le pôle d'un fort barreau à quelques centimètres au-dessus d'un de ces deux cônes, son sommet s'affaisse et sa base s'étend ; à mesure qu'on rapproche le pôle de l'aimant, l'affaissement du sommet et l'élargissement de la base deviennent plus considérables. A une certaine distance, la surface du mercure redevient tout à fait plane, et le mercure commence à tourner lentement autour du conducteur. L'aimant continuant à s'avancer, le mouvement de rotation s'accélère, et, enfin, quand il est parvenu à 1 centimètre environ de la surface du mercure, on remarque, au-dessus du fil, une grande dépression et un tourbillon conique qui descend presque jusqu'à son extrémité. Dans certaines expériences de Davy, ces élévations et ces dépressions alternatives du mercure au-dessus et au-dessous de sa sur-

face dans le reste du vase atteignaient 5 millimètres.

Davy a obtenu des résultats du même genre en remplaçant le mercure par un bain d'étain en fusion dans une capsule de porcelaine.

ARTICLE V.

DU GALVANOMÈTRE.

Supposons qu'on présente une aiguille aimantée, suspendue à un fil de soie sans torsion, à un conducteur quelconque placé dans le plan du méridien magnétique; toutes les fois que le conducteur donnera passage à un courant électrique, on en sera averti par la déviation de l'aiguille; de plus, en tenant compte de la position du conducteur par rapport à l'aiguille et de la direction dans laquelle le *pôle austral* est repoussé, on déterminera facilement le *sens* du courant lui-même. Mais, pour écarter l'aiguille du plan du méridien magnétique, le courant électrique doit lutter contre l'action de la terre qui tend sans cesse à l'y ramener; dès lors, on conçoit qu'un courant de faible intensité puisse ne pas exercer d'influence appréciable sur une aiguille fortement aimantée. En adoptant des dispositions particulières qui permettent de *multiplier l'action* du courant, et de *diminuer la force directrice* de l'aiguille, les physiciens sont parvenus à construire un instrument appelé *galvanomètre*, qui jouit d'une sensibilité excessive, et qui fournit les moyens de déceler la présence et de déterminer le sens des courants électriques les plus faibles.

1° Multiplication du courant. — Disposons une aiguille aimantée de manière qu'elle soit placée entre les deux portions horizontales AB et CD (Fig. 211) d'un fil conducteur replié à angle droit sur lui-même dans le plan du méridien

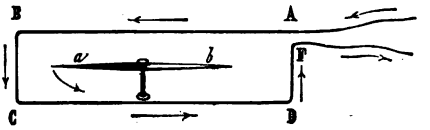


Fig. 211.

magnétique, et mettons les extrémités du fil en communication avec les pôles d'une pile. L'aiguille sera soumise à l'action de deux courants horizontaux AB, CD de sens inverses, dont l'un passe au-dessus et l'autre au-dessous de son point de suspension, et de deux courants verticaux dont l'un, BC, est descendant, et l'autre, DF, est ascendant. En tenant compte de leur position, on voit facilement que ces quatre courants ont la *gauche* tournée du même côté, *en avant* de la figure. L'aiguille est donc sollicitée par quatre actions concordantes, qui toutes tendent à la placer dans une position perpendiculaire au plan commun des courants, le *pôle austral* tourné *en avant* de la figure.

Cela posé, autour d'un cadre rectangulaire de bois CC (Fig. 212), enroulons un fil fin de cuivre très long et enveloppé de soie, de manière à former un grand nombre de circonvolutions parallèles et *isolées*. Après avoir tourné le cadre dans la direction du méridien magnétique, plaçons, en son centre, une aiguille aimantée suspendue à un fil de soie sans torsion. Si nous mettons les

extrémités D et F du fil de cuivre en communication avec les pôles d'une pile, l'électricité parcourra le fil dans toute son étendue, et chaque circonvolution représentera un courant distinct agissant sur l'aiguille. Mais,

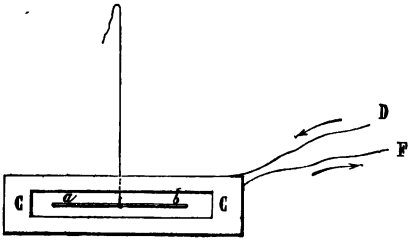


Fig. 212.

comme dans une portion quelconque du circuit, ces courants sont tous parallèles et de même sens, il en résulte que leurs influences seront concordantes et repousseront le *pôle austral* du même côté du méridien magnétique; l'action du courant électrique sera donc réellement *multipliée*. Cet appareil très simple est le *multiplicateur* de Schweigger, imaginé et employé par ce physicien pour constater la présence et déterminer le sens de courants électriques très faibles.

2° Diminution de la force directrice de l'aiguille. — Perpendiculairement à l'axe d'une paille M suspendue à un fil de soie sans torsion (Fig. 213), implantons deux aiguilles aimantées parallèles, dont les *pôles* de même nom soient placés en sens inverse. Chacune de ces aiguilles, sous l'influence de l'action terrestre, tend à tourner autour de son point de suspension, de manière que son *pôle*

austral regarde vers le nord. Il en résulte que le système entier est sollicité à exécuter autour de son axe deux mouvements rotatoires de sens inverses, dont l'un est provoqué par la force directrice de l'aiguille supérieure, et

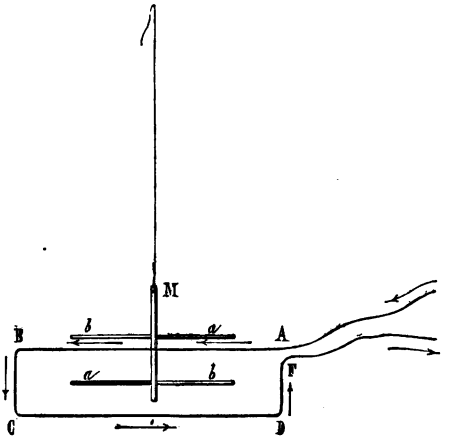


Fig. 213.

l'autre par la force directrice de l'aiguille inférieure. Si ces deux forces directrices sont égales, évidemment la résultante de ces deux actions sera nulle ; ce système restera donc en équilibre dans quelque situation qu'on le place, il sera *astatique*. Si, au lieu de prendre deux aiguilles d'égale force, nous les choisissons de manière que l'inférieure, par exemple, soit plus aimantée que la supérieure, le système entier aura une force directrice égale à la différence des deux forces directrices des aiguilles, obéira à l'action de la terre et se placera dans une position telle que les deux aiguilles soient dans le plan du méridien ma-

gnétique, le *pôle austral* de l'inférieure tourné vers le nord. En choisissant convenablement les deux aiguilles, on peut donc, ainsi, construire un système sensible à l'action terrestre, et dont la *force directrice* soit aussi faible qu'on le désire.

Soumettons le système des deux aiguilles à l'action d'un courant rectangulaire ABCDF ; chacune des aiguilles sera influencée par deux courants horizontaux AB, CD, et par deux courants verticaux BC, DF.

Courants horizontaux. — Les deux courants horizontaux agissent sur l'aiguille inférieure de manière à pousser son *pôle austral en avant* de la figure. Le *pôle austral* de l'aiguille supérieure est poussé en *arrière* de la figure par le courant AB, et *en avant* par le courant CD ; mais, comme le courant CD est situé à une plus grande distance, et, par conséquent, agit plus faiblement que le courant AB, la résultante des deux influences contraires exercées par les deux courants horizontaux sur l'aiguille supérieure tend à repousser son *pôle austral en arrière* de la figure. En vertu de l'action *totale* des deux courants horizontaux, le système tourne donc sur son axe de suspension, le *pôle austral* de l'aiguille inférieure se place *en avant*, et le *pôle austral* de l'aiguille supérieure *en arrière* de la figure.

Courants verticaux. — Ce mouvement général du système est favorisé par l'influence des courants verticaux sur l'aiguille inférieure, et contrarié par celle de ces mêmes courants sur l'aiguille supérieure. Mais, comme ces courants verticaux sont plus rapprochés de l'aiguille inférieure que de la supérieure, la résultante de leur action

totale s'accorde avec celle de l'action des courants horizontaux pour faire tourner le système dans un sens déterminé.

Galvanomètre. — Nobili a eu l'heureuse idée d'introduire, dans le *multiplicateur* de Schweigger, un système de deux aiguilles compensées. Il a construit ainsi un appareil d'une extrême sensibilité, à l'aide duquel on peut constater l'existence et déterminer le sens des courants électriques les plus faibles.

Dans le galvanomètre (Fig. 214), le fil de cuivre est enroulé sur un châssis d'ivoire AB auquel on peut commu-

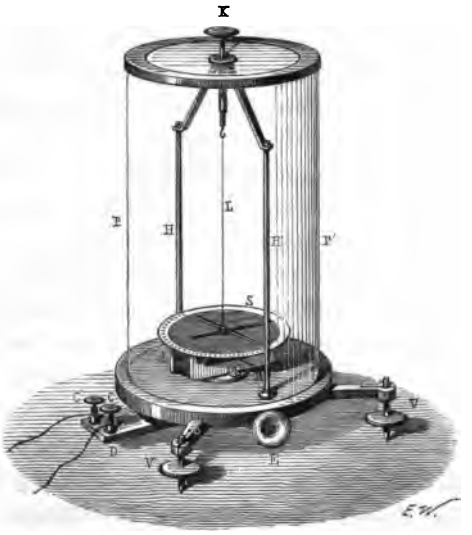


Fig. 214.

niquer, au moyen du bouton E, un mouvement horizontal de rotation autour de son axe vertical de figure. Dans ce

mouvement, le châssis entraîne une lame rectangulaire d'ivoire D, dont l'extrémité libre porte deux boutons métalliques C, C'. Les extrémités du fil métallique enroulé sur le châssis aboutissent à ces boutons munis, eux-mêmes, des fils destinés à établir la communication de l'appareil avec les pôles de l'électromoteur. Un crochet de cuivre supporté par les deux colonnes de même métal H, H' sert à suspendre le fil de cocon L, à la partie inférieure duquel est fixé un système de deux aiguilles aimantées compensées de manière que leur ensemble ait une force directrice très faible. Le bouton K sert à élever ou à abaisser à volonté le système des aiguilles compensées. Un cadran divisé S est placé entre l'aiguille supérieure et le châssis; le *zéro* de la division est dans l'axe du châssis; et le cadran porte une fente longitudinale qui permet de mettre les aiguilles en place et de les retirer. L'appareil est porté sur trois pieds à vis calantes V qui servent à le mettre de niveau et à centrer les aiguilles. L'appareil est enveloppé d'une cloche de verre PP' qui protége les aiguilles et le fil suspenseur contre les agitations de l'air ambiant.

Quand on veut mettre l'appareil en observation, on imprime au châssis AB un mouvement horizontal de rotation, et l'on fait, ainsi, coïncider une des extrémités de l'aiguille supérieure avec le zéro de la graduation du cadran S. Dans cette position, les deux aiguilles sont dans le plan du méridien magnétique, et parallèles aux spires du fil de cuivre enroulé sur le châssis AB. Si, alors, on met les boutons C, C', en communication avec les pôles d'un électromoteur quelconque, le courant traverse le fil enroulé sur le châssis, et fait tourner le système des deux aiguilles

autour du fil suspenseur L comme axe. Le sens de la déviation de l'aiguille supérieure indique le sens du courant.

Dans les recherches d'électricité dynamique, il suffit d'entourer de soie le fil de cuivre enroulé autour du châssis, pour que ses diverses spires soient *isolées* l'une de l'autre, et qu'il ne s'établisse entre elles aucune communication accidentelle. Mais, quand on veut se servir d'un galvanomètre pour étudier la décharge de la machine électrique ou de la bouteille de Leyde, cette précaution n'est pas suffisante; il faut encore, à cause de la tension considérable de l'électricité dans ces circonstances, avoir soin de recouvrir le fil d'un vernis à la gomme laque bien uniformément appliqué, et de séparer par une couche de vernis les divers plans de spires superposées.

Avec un galvanomètre ainsi préparé, il est facile de démontrer que la décharge d'une machine électrique ou d'une batterie agit sur l'aiguille aimantée, comme le courant de la pile. M. Colladon (1) a mis ce fait hors de toute contestation, en procédant de la manière suivante.

Une extrémité du fil du galvanomètre était en contact avec l'armure extérieure d'une batterie de trente jarres, tandis que l'autre extrémité, munie d'une pointe métallique très fine, était rapprochée et maintenue à deux ou trois centimètres du bouton de la garniture intérieure. La batterie se déchargeait lentement à travers le fil, et l'aiguille aimantée était déviée dans le sens indiqué par la nature de l'électricité accumulée sur la garniture intérieure.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1826, t. XXXIII, p. 62.

M. Colladon a obtenu des résultats du même genre, en mettant une des extrémités du fil du galvanomètre en contact avec les coussinets d'une machine électrique à plateau, et en présentant l'autre extrémité terminée en pointe au conducteur de la machine. Il a, aussi, fixé une extrémité du fil du galvanomètre au conducteur positif, et l'autre au conducteur négatif d'une machine de Nairne. La déviation, dans ce dernier cas, est parfaitement régulière et proportionnelle à la vitesse de rotation du cylindre de verre.

Ces faits, rapprochés des résultats obtenus par Savary, tendent à établir que les décharges d'électricité statique jouissent des mêmes propriétés que les courants fournis par les piles, et sont elles-mêmes de véritables courants.

Les galvanomètres diffèrent les uns des autres par le diamètre et la longueur du fil enroulé sur le châssis. Dans les uns, appelés galvanomètres *à fil court*, le fil de cuivre a deux tiers ou un cinquième de millimètre de diamètre, et le nombre des tours varie entre *trente* et *trois cents*. Dans les galvanomètres à *long fil*, le diamètre du fil de cuivre est beaucoup moindre, et le nombre des tours, qui ne s'abaisse pas au-dessous de *deux mille*, s'élève quelquefois jusqu'à *vingt-sept mille*. Nous verrons plus tard que, suivant l'origine du courant dont on veut étudier les effets, il faut employer le galvanomètre à *long fil* ou le galvanomètre à *fil court*.

Galvanomètre différentiel. — Cet instrument, imaginé par M. Becquerel, est très commode pour comparer les intensités de deux courants. Pour le construire, on prend deux fils entourés de soie parfaitement semblables,

c'est-à-dire de même nature, de même longueur et de même diamètre; puis on les enroule simultanément autour du châssis, de manière qu'ils soient semblablement placés par rapport aux aiguilles. On a ainsi deux circuits parfaitement distincts, dont chacun peut livrer passage à un courant. Si l'on dirige à travers ces fils deux courants de sens opposés, les actions des deux circuits sur les aiguilles se contrarient, et l'action résultante est nécessairement égale à la différence des deux actions contraires. Si l'un des deux courants est plus fort que l'autre, il y a déviation dans le sens correspondant au courant le plus intense, et l'étendue de la déviation peut servir à mesurer la différence des intensités. Mais, si les deux courants sont de même intensité, évidemment l'action résultante est nulle, et l'aiguille reste en équilibre sur le *zéro* de la graduation entre ces deux forces égales et de sens contraires. Ceci suppose que les deux circuits distincts formés par les fils conducteurs sont bien symétriquement placés par rapport aux aiguilles. Pour atteindre ce résultat, M. Poggendorff (1) a proposé de tordre les deux fils l'un autour de l'autre, et d'en faire ainsi un seul cordon qu'on enroule sur le châssis de l'appareil. Avec cette disposition très simple, il est facile de voir que toute irrégularité provenant d'un défaut de symétrie est écartée.

Nous n'avons parlé du galvanomètre que comme moyen de reconnaître la présence et le sens des courants électriques, nous verrons plus tard que cet appareil peut aussi servir à apprécier leur degré de force. Nous ren-

(1) *Archives de l'électricité*, 1845, t. V, p. 143.

voyons l'examen de cette question à la partie de notre travail consacrée à l'exposition des méthodes employées pour mesurer et comparer les intensités des courants.

CHAPITRE II.

ORIGINES DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE.

Les physiciens donnent le nom de force *électromotrice* à toute cause, quelles que soient d'ailleurs sa nature et son origine, capable de troubler le *repos* ou l'*équilibre électriques*. Les circonstances au milieu desquelles la force *électromotrice* peut prendre naissance sont très nombreuses et très variées; elles se partagent en quatre groupes bien distincts : les *actions mécaniques*, les *actions chimiques*, les *actions physiques* et les *actions physiologiques*. Nous ne dirons rien ici des *actions physiologiques*, nous réservant de les étudier, avec tous les détails convenables, dans un travail spécial.

ARTICLE PREMIER.

ACTIONS MÉCANIQUES.

Le frottement, la pression, le simple clivage, peuvent développer une force électromotrice. Volta pensait que, dans la pile qui porte son nom, le mouvement de l'agent

électrique est le résultat d'une action de *contact* entre métaux hétérogènes; nous traiterons cette question importante avec tous les développements qu'elle comporte, mais nous renverrons cette discussion à l'article suivant consacré à l'étude des actions chimiques considérées comme sources de force électromotrice.

Du frottement. — Fixons notre attention sur la succession des phénomènes produits par la machine de Nairne en activité (Fig. 215). Au moment où le cylindre

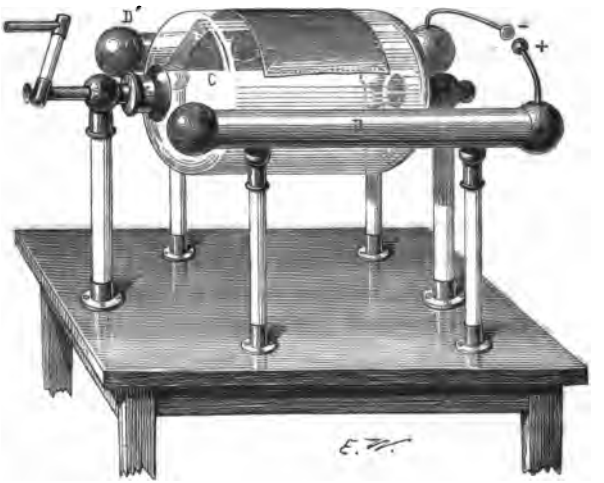


Fig. 215.

de verre est mis en rotation, le *repos électrique* est troublé sur la surface de contact du coussin frotteur et du cylindre de verre ; le coussin et le conducteur D' prennent la *tension négative*, le cylindre de verre prend la *tension positive;* ce cylindre agit à son tour, par induction, sur le

conducteur D. L'électricité négative ainsi développée par induction neutralise la positive du cylindre de verre, et le conducteur D prend et conserve la *tension positive*. Finalement, les deux conducteurs acquièrent des *tensions égales et de signes contraires*. A mesure que le cylindre de verre tourne, les tensions des conducteurs D, D′ augmentent, et s'élèvent rapidement à un *maximum* qui dépend surtout de l'état hygrométrique de l'atmosphère et de la nature de l'enduit qui recouvre la surface du coussin frotteur. Les conducteurs D, D′ ont atteint ce *maximum* de charge, lorsque les pertes, occasionnées par le contact de l'atmosphère et par la conductibilité des supports, sont assez considérables pour donner écoulement à toute l'électricité développée par la machine. A partir de ce moment, l'action du frottement ne sert plus qu'à maintenir les *tensions opposées* des conducteurs D, D′; mais, tant que ces conducteurs restent isolés, que le cylindre de verre tourne sur son axe et que les conditions ambiantes ne changent pas, la *différence algébrique des tensions positive et négative* reste *constante*. Cette *différence de tension* est nécessairement la mesure de l'intensité de la *force* qui a troublé l'état primitif de *repos électrique* sur la surface de frottement, et maintient un nouvel *état d'équilibre électrique* sur les conducteurs D, D′.

Si nous faisons communiquer les deux conducteurs D, D′ à l'aide du fil d'un galvanomètre, les tensions se neutralisent à travers le circuit métallique; mais ces tensions sont incessamment renouvelées par l'action du frottement, et il s'établit, de D en D′, un véritable courant électrique dont la présence et l'intensité sont traduites par la déviation de l'aiguille aimantée.

La force qui, dans la machine de Nairne, prend naissance sous l'influence du frottement, trouble le *repos électrique* et produit la charge des conducteurs, est donc une véritable force *électromotrice*. Elle met en mouvement l'agent électrique, elle produit une différence de tension entre deux corps en présence, elle maintient cette différence de tension, quelles que soient les causes de déperdition ; et, quand les conducteurs communiquent par un arc métallique, elle renouvelle les tensions opposées assez rapidement pour entretenir un véritable courant dans le circuit. La machine de Nairne est un véritable *électromoteur*, un *couple électrique*, dont les *surfaces polaires* sont représentées par les conducteurs D, D'.

Ce que nous venons de dire de la machine de Nairne s'applique évidemment à toutes les machines à *plateau de verre*, et aussi à la machine *hydro-électrique* de M. Armstrong. Quels que soient les corps employés dans ces appareils, il y a production d'une *force électromotrice* sur la surface de frottement.

Dans les machines électriques, le fluide accumulé sur les conducteurs *isolés* peut acquérir un très haut degré de tension ; la *force électromotrice* développée par le frottement est donc *très intense*. Cette *force électromotrice* peut maintenir en présence de très puissantes charges électriques de noms contraires, et s'opposer à leur recomposition ; elle a assez d'*activité* pour réparer *instantanément* les pertes éprouvées par l'air et par les supports. Mais le mouvement communiqué à l'électricité n'est pas assez rapide pour suffire à l'écoulement qui s'effectue à travers un corps bon conducteur, et en même temps maintenir les tensions

des *surfaces polaires* à un aussi haut degré d'intensité. Quand les surfaces polaires des machines à frottement communiquent à l'aide d'un fil métallique, il s'établit bien un courant continu d'électricité à travers le circuit fermé, mais les tensions *polaires* s'affaiblissent considérablement et deviennent presque insensibles. On comprend ainsi pourquoi les machines à frottement, si puissantes quand il s'agit d'accumuler des charges d'électricité statique sur des conducteurs isolés, ne fournissent que des courants d'électricité dynamique extrêmement faibles.

Nous avons dit (page 70) que, dans la machine de Nairne, quand un des conducteurs communique avec le sol, la charge recueillie sur l'autre conducteur peut atteindre un degré de tension plus élevé que si les deux conducteurs sont maintenus isolés. Ce résultat s'explique très facilement. En effet, la *force électromotrice* développée par le frottement a une intensité constante, et, par suite, la *différence algébrique* des tensions qui peuvent être maintenues sur les conducteurs est aussi constante. Or, lorsqu'un des conducteurs est en communication avec le sol, sa *tension* est *nulle ;* dans ce cas, pour que la *force électromotrice* soit satisfaite, la *tension* du conducteur *isolé* doit évidemment atteindre un degré plus élevé que si les deux conducteurs, *isolés* à la fois, prenaient des charges de signes contraires.

Le frottement de deux corps *conducteurs*, de deux métaux de nature différente, peut aussi développer une force électromotrice. Fixons deux plaques métalliques de nature différente aux extrémités du fil d'un galvanomètre, et frottons-les l'une contre l'autre en les tenant par des

manches isolants. Immédiatement, l'une des plaques prend la tension positive, et l'autre la tension négative (1); tant que dure le frottement, cette différence de tension persiste, et le fil du galvanomètre est traversé par un courant d'électricité dynamique que traduit la déviation de l'aiguille aimantée. Déjà M. Becquerel avait fait observer que, si l'on classe les métaux dans un ordre tel que chacun d'eux soit négatif par rapport à ceux qui le suivent, et positif par rapport à ceux qui le précèdent, le même ordre convient aux courants électriques produits par le frottement et aux courants thermo-électriques. M. Gaugain (2) a repris l'étude du frottement considéré comme source de force électromotrice; contrairement à l'opinion adoptée par M. Becquerel, il pense que les effets électriques observés sont dus à l'échauffement des plaques métalliques frottées, et il a conclu de ses expériences que : *les courants produits par le frottement de deux plaques métalliques ne sont pas autre chose que des courants thermo-électriques.*

Rappelons ici qu'il suffit de faire tomber sur une plaque métallique inclinée de la limaille du même métal, pour obtenir des signes sensibles d'électrisation. Sous l'influence de ce léger frottement, la limaille prend toujours la tension *négative*, et la plaque métallique la tension *positive*.

Pression. — Les expériences d'Æpinus, Libes et Haüy,

(1) Becquerel, *Traité de l'électricité et du magnétisme*, 1834, t. II, p. 113.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1853, t. XXXVI, p. 541.

avaient déjà prouvé depuis longtemps que la simple pression, *sans frottement latéral*, est une source d'électricité. M. Becquerel (1) a publié un travail très étendu sur ce sujet. Il résulte de ses recherches que, quand on presse l'un contre l'autre deux corps dont l'*un au moins est isolant*, ces deux corps, après leur séparation, sont toujours chargés d'électricités de noms contraires. Il suffit d'une légère différence de température entre les deux corps pressés pour modifier la distribution des tensions acquises pendant la pression; celui des deux corps qui est le plus chaud tend à devenir *négatif*. — En pressant deux corps *métalliques* l'un contre l'autre, quelle que soit la rapidité de séparation, on n'obtient aucune trace d'électrisation.

Clivage. — Lorsqu'on *clive* rapidement des corps lamellaires cristallisés, tels que le mica, la baryte sulfatée, le feldspath, le talc, etc., les portions séparées sont électrisées et leurs tensions sont de signes contraires. — On obtient des résultats de même nature en dédoublant rapidement une carte à jouer. — Le soufre, le chocolat, l'acide borique, etc., s'électrisent quand on les détache d'une plaque de verre sur laquelle ils se sont solidifiés; le corps détaché et la plaque de verre prennent des tensions de signes contraires.

(1) *Traité de l'électricité et du magnétisme*, 1834, t. II, p. 97.

ARTICLE II.

ACTIONS CHIMIQUES.

L'idée de considérer l'action chimique comme une source d'électricité n'est pas nouvelle dans la science. Dès les premiers temps où Volta fit connaître sa belle découverte, Fabroni, Wollaston, Parrot, etc., s'efforcèrent de démontrer que la véritable cause du courant fourni par le couple voltaïque devait être cherchée dans les réactions réciproques des liquides et des métaux, dont il se compose. Les nombreux travaux dont la science s'est enrichie depuis, et surtout ceux de MM. Becquerel, De La Rive et Faraday, ont fait triompher cette doctrine aujourd'hui généralement adoptée.

A. **Combustions.** — Il résulte des recherches de M. Pouillet et de beaucoup de physiciens que, dans toute combustion, l'oxygène et le corps brûlé prennent des *tensions électriques opposées ;* l'oxygène devient *positif*, tandis que le corps brûlé devient *négatif*. L'exactitude de ce principe a été vérifiée, dans ces derniers temps, par M. Gaugain dans un remarquable travail présenté à l'Académie des sciences (1).

B. **Action des acides sur les métaux.** — Toutes les fois qu'une lame métallique est attaquée par un acide, ces deux corps prennent des *tensions opposées*, et les *con-*

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1854, t. XXXVIII, p. 731.

servent tant que dure l'action chimique. Ces phénomènes électriques peuvent être observés à l'*état statique* à l'aide d'un électromètre condensateur; il est plus facile et plus exact de les étudier sous forme de *courants* avec un galvanomètre.

Soient : P (Fig. 216) une lame de platine fixée à une planchette M de bois sec, et Z une lame de zinc fixée également à la planchette N ; plongeons ces deux métaux dans

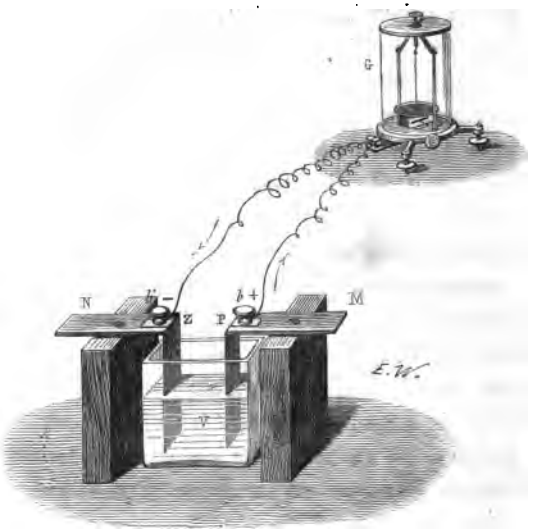


Fig. 216.

de l'*acide sulfurique* étendu d'eau contenu dans le vase de verre V, et mettons les boutons métalliques *b*, *b'* en communication avec les extrémités du fil d'un galvanomètre G. Il s'établit immédiatement, à travers le système, un *cou-*

rant électrique dont la déviation de l'aiguille aimantée indique l'existence et le sens. Le platine, que l'acide *n'attaque pas* prend a *tension positive*, tandis que le zinc, *seul dissous* par l'acide, prend la *tension négative;* en sorte que le courant marche du platine au zinc à travers le fil du galvanomètre, et du zinc au platine à travers le liquide acide.

Dans l'appareil précédent, remplaçons (Fig. 217) la

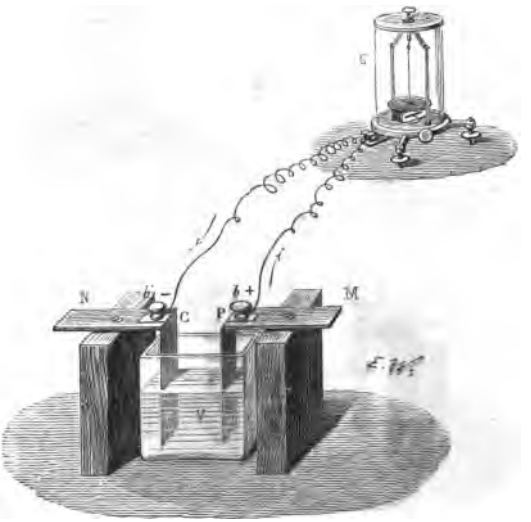


Fig. 217.

lame *zinc* Z par une lame de *cuivre* C, et l'*acide sulfurique* par de l'*acide azotique étendu d'eau*, nous obtiendrons des résultats du même genre. La tension du platine, métal *non attaqué*, sera *positive*, et celle du cuivre, *attaqué*

par l'acide, sera *négative*. Le courant produit marchera du platine au cuivre dans le fil du galvanomètre, et du cuivre au platine dans le liquide acide.

Soumettons à une épreuve de ce genre les éléments qui entrent dans la composition d'un *couple voltaïque*. Dans le vase V rempli d'acide sulfurique étendu (Fig. 218), plongeons une lame de zinc Z, et une lame bien décapée de cuivre C : l'acide sulfurique dissout le

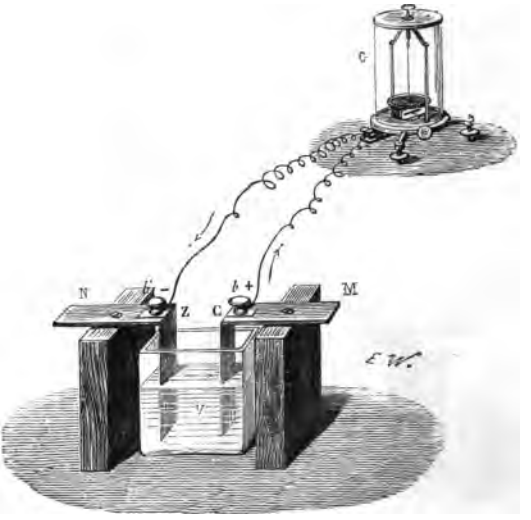


Fig. 218.

zinc, et le cuivre n'est pas attaqué ; il n'y a donc d'action chimique que sur la lame de zinc. La déviation de l'aiguille aimantée accuse un courant dirigé du *cuivre* au *zinc*, à travers le fil du galvanomètre G. C'est donc encore le

métal *non attaqué*, le cuivre, qui prend la *tension positive*, et le métal *attaqué*, le zinc, qui prend la *tension négative*. Dans le liquide acide, le courant marche toujours du métal dissous au métal non attaqué, c'est-à-dire du zinc au cuivre.

D'ailleurs, pour que les métaux prennent ainsi des *tensions électriques opposées*, il ne suffit pas qu'ils soient mis en *contact* avec un liquide acide ; il faut de toute nécessité que l'acide employé *agisse chimiquement* sur l'une des deux plaques métalliques en présence. L'expérience suivante ne laisse aucun doute sur l'exactitude de cette proposition.

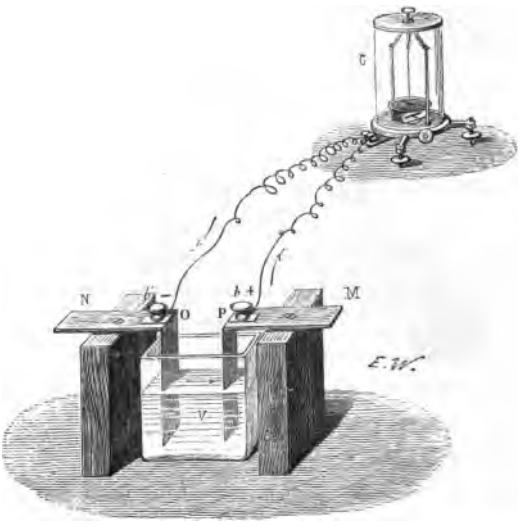


Fig. 219.

Dans un vase V de verre rempli d'acide azotique étendu (Fig. 219), plongeons une lame d'or O, et une

lame de platine P fixées aux extrémités du fil du galvanomètre G. Ni l'or, ni le platine ne sont attaqués, et l'aiguille aimantée indique, par son immobilité, qu'aucun effet électrique n'est produit. Autour de la lame d'or O versons quelques gouttes d'acide chlorhydrique; l'or est dissous, et le platine n'éprouve aucune action chimique. Immédiatement l'aiguille aimantée est déviée, et accuse la présence d'un courant électrique dirigé de la lame de platine à la lame d'or dans le fil du galvanomètre, et de l'or au platine dans le liquide acide. Dans cette expérience comme dans les précédentes, c'est donc le platine, métal *non attaqué*, qui prend la *tension positive*, et l'or, métal *attaqué*, qui prend la *tension négative*.

Puisque, en dehors de l'action chimique, le simple contact d'un liquide acide et d'un métal ne produit aucun effet électrique, nous devons admettre que, dans les expériences précédentes, les métaux *non attaqués* sont en équilibre de tension avec les liquides acides, et ne servent qu'à mettre leur *état électrique* en évidence. De ces faits découlent naturellement les conclusions suivantes :

1° L'action chimique qui s'exerce entre un métal et un acide développe une *force électromotrice* capable de *déterminer* et *maintenir* une différence de tension entre les deux corps en présence; le métal devient *négatif*, et l'acide devient *positif*.

2° Cette *force électromotrice*, persistant dans son action autant que l'action chimique elle-même, renouvelle incessamment les *tensions* à mesure qu'elles se neutralisent à travers l'*arc conjonctif*, et entretient un *courant électrique* dirigé, dans cet arc, de l'*acide* au *métal attaqué*.

C. **Actions réciproques des dissolutions salines et des métaux.** — Dans un vase de verre V contenant une dissolution de sulfate de cuivre (Fig. 220), plongeons une lame P de platine, et une lame Z de zinc en communication avec les extrémités du fil d'un galvanomètre. Le zinc prend, dans le sel, la place du cuivre ; il se forme du sulfate de zinc,

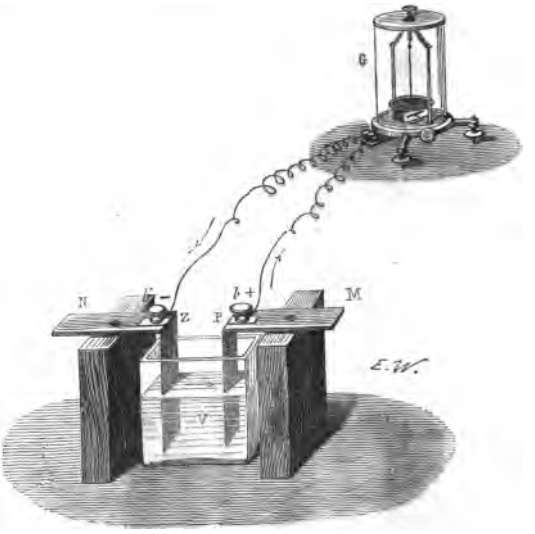


Fig. 220.

et le cuivre se dépose à l'état métallique sur la plaque de platine. En même temps, le platine prend la tension *positive*, et le zinc la tension *négative ;* l'aiguille aimantée déviée accuse le passage d'un courant électrique dirigé du platine au zinc à travers le fil du galvanomètre, et du zinc au platine dans la dissolution saline du vase V.

Lorsqu'un métal se substitue à un autre dans une dissolution saline, tout se passe donc comme dans le cas où ce métal est attaqué par un acide.

D. **Action d'un acide sur une base.** — Pour mettre en évidence les résultats de l'action chimique exercée par un acide sur une base, versons de l'acide sulfurique étendu dans le vase de verre V (Fig. 221), et une dissolution de

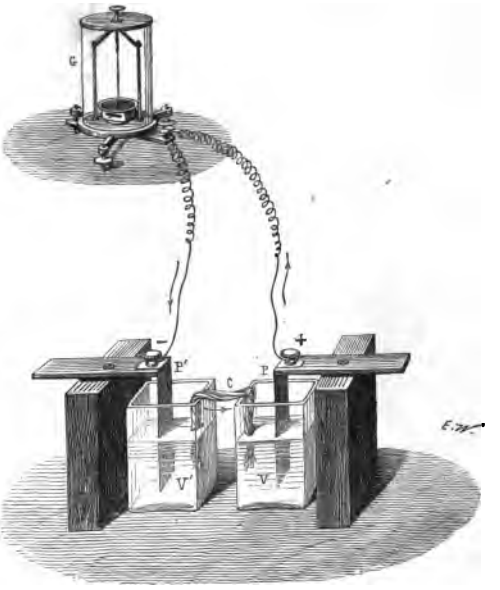


Fig. 221.

potasse dans le vase V'. Après avoir fait communiquer les deux vases au moyen d'une mèche de coton C, plongeons dans l'acide une lame de platine P, et dans la dissolution

alcaline une lame de platine P′, toutes deux en communication avec les extrémités du fil d'un galvanomètre G. Les liquides soulevés par la capillarité se combinent dans la mèche de coton, et il se forme du sulfate de potasse. La lame de platine P plongée dans le liquide *acide* prend la tension *positive*, et la lame P′ en contact avec le liquide alcalin prend la tension *négative;* l'aiguille aimantée est déviée par un courant dirigé de l'acide sulfurique à la dissolution de potasse à travers le fil du galvanomètre, et de la dissolution alcaline à l'acide à travers les liquides. Les *acides*, en présence des *bases*, se conduisent donc comme dans le cas où ils attaquent un *métal*.

Des études du même genre étendues à beaucoup d'autres substances permettent d'établir que :

Deux corps qui se combinent *prennent des états électriques contraires, et les conservent tant que dure la réaction chimique:* celui qui joue le rôle de l'*oxygène* ou de l'*acide* prend la *tension positive;* celui qui joue le rôle du *métal* ou de la *base* prend la *tension négative*.

DU CONTACT.

Dans la pile voltaïque, les couples successifs sont en communication par le *contact direct* des métaux hétérogènes. Pour Volta, la véritable cause du développement de la force électromotrice était le contact de ces métaux hétérogènes. Cette théorie a été adoptée et défendue par Pfaff, Marianini, Fechner, Zamboni, Ohm et une grande partie de l'école allemande. Fabroni, Wollaston,

Parrot, Œrsted, MM. Becquerel, De La Rive, Pouillet Schœnbein, Matteucci, Faraday, et beaucoup d'autres savants d'un très haut mérite, ont au contraire soutenu que l'action chimique est la seule source démontrée du pouvoir de la pile. Bien que l'opinion adoptée par ces derniers physiciens nous paraisse reposer sur des preuves expérimentales incontestables, cependant, avant d'aborder l'analyse des phénomènes qui se passent dans un couple voltaïque, nous croyons indispensable de rapporter ici quelques-uns des principaux faits qui ne permettent plus d'admettre l'existence d'une force électromotrice de contact. Nous emprunterons ces faits au grand travail de M. Faraday sur l'*Origine du pouvoir de la pile voltaïque* (1). Et d'abord un mot sur quelques dénominations adoptées.

Lorsqu'on fait communiquer (Fig. 222), au moyen du fil métallique d'un galvanomètre G, une plaque de zinc Z et une plaque de platine P plongées dans de l'acide sulfurique étendu, le circuit fermé est traversé par un courant électrique qui marche de P en Z dans le fil conjonctif, et de Z en P dans le liquide du couple. Par rapport au courant qui traverse le fil conjonctif, le platine P est le pôle *positif* et le zinc Z est le pôle *négatif*. Mais, pour classer les métaux par leurs propriétés électriques relatives, on considère exclusivement le sens suivant lequel le courant traverse le couple lui-même. Comme cette dernière partie du courant se dirige du zinc au platine, on dit que le zinc cède l'électricité positive au platine, ou que le zinc est un *métal positif* par rapport au platine, et le platine un

(1) *Archives de l'électricité*, 1841, t. I, p. 93 et 342.

métal négatif par rapport au zinc. Il en résulte que, dans la théorie chimique de la pile, on appelle *métal positif* celui

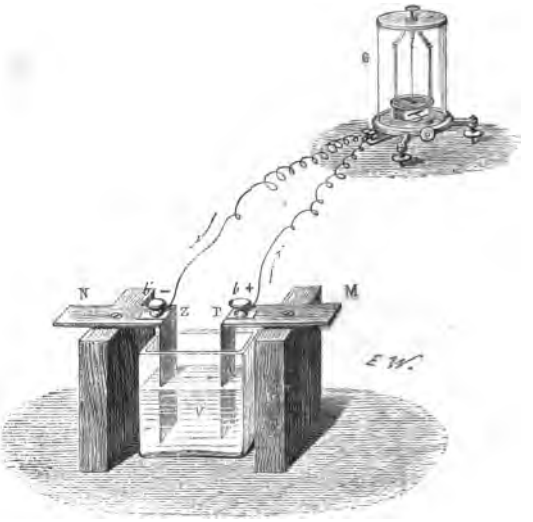


Fig. 212.

qui est *attaqué* par les acides, ou qui sert de *pôle négatif* au courant dans l'arc conjonctif.

Les combinaisons voltaïques employées par M. Faraday sont extrêmement simples, et permettent de séparer très nettement l'action du contact des métaux de l'effet produit par les réactions chimiques.

A. **Couples à liquides inactifs.** — Parmi les liquides employés, nous ne parlerons que de la dissolution du sulfure de potassium, et de la dissolution de potasse caustique.

1° *Sulfure de potassium* (1). — La dissolution concentrée et parfaitement limpide de sulfure de potassium jouit de la propriété de conduire très bien l'électricité dynamique, et de se laisser traverser par des courants très faibles. Cette propriété est importante pour l'étude des phénomènes actuels.

Dans un vase N contenant de la dissolution de sulfure de potassium (Fig. 223), plaçons une lame de platine P′ et

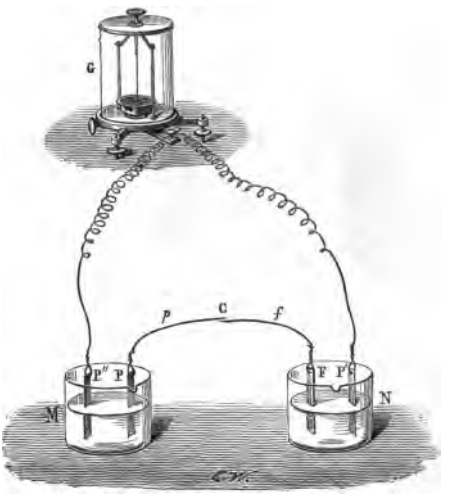


Fig. 223.

une lame de fer F; dans un second vase M rempli de la même dissolution, plongeons deux lames de platine P, P″. Fixons les lames P″, P′ aux extrémités du fil d'un galva-

(1) *Loc. cit.*, p. 104.

nomètre G, et faisons communiquer les lames F, P au moyen d'un fil de fer *f* et d'un fil de platine *p*. Le sulfure de potassium n'exerce *aucune action chimique* ni sur le fer ni sur le platine, et, quoique au point C il y ait *contact de deux métaux hétérogènes*, l'aiguille du galvanomètre reste immobile, aucun courant ne traverse le circuit. Séparons les fils *p* et *f* au point C, et plaçons entre eux un métal quelconque tel que le *zinc*, par exemple; bien qu'il y ait *contact*, d'une part entre le zinc et le platine, et d'autre part entre le zinc et le fer, il n'y a pas de courant produit. Maintenant, au point C, plaçons un morceau de papier imbibé d'acide sulfurique entre les deux fils; le fer est *seul* attaqué, l'aiguille du galvanomètre est déviée, le circuit est traversé par un courant qui passe, à travers le papier, du fer au platine: le fer joue le rôle de *métal positif*, comme l'indique la théorie chimique.

Dans cette combinaison voltaïque, la lame de fer peut être remplacée par du nickel ou par tout autre métal sur lequel le sulfure de potassium soit sans action, et toujours les résultats restent les mêmes. Il n'y a pas de courant toutes les fois que l'action chimique manque, bien que le *contact* existe; il y a, au contraire, courant toutes les fois qu'un liquide actif est interposé au point C, et le métal attaqué est *positif* par rapport à l'autre.

2° *Potasse caustique* (1). — La solution concentrée de potasse caustique ne conduit pas aussi bien l'électricité dynamique que la dissolution du sulfure de potassium; cependant elle laisse passer d'une manière évidente des

(1) *Loc. cit.*, p. 115.

courants même très faibles. Dans la combinaison précédente, remplaçons la solution de sulfure de potassium par une dissolution concentrée de potasse, la lame de fer F par une lame d'argent, et le fil de fer *f* par un fil d'argent; le liquide n'exerce *aucune action chimique* ni sur l'argent, ni sur le platine. Au point C, il y a *contact* de deux métaux hétérogènes, et cependant il n'y a pas de courant développé. Mais, si au point C on place, entre l'argent et le platine, un morceau de papier imbibé d'acide azotique, immédiatement l'argent est attaqué, un courant se développe, et l'argent joue le rôle de métal *positif* par rapport au platine.

M. Faraday a employé successivement de l'acide nitreux hydraté, de l'acide azotique et de l'acide azotique additionné d'acide nitreux. Toutes les fois que la combinaison voltaïque était formée de métaux sur lesquels ces liquides étaient sans action, il a constaté que le *contact seul* ne développait aucun courant électrique.

B. **Couples à liquides actifs** (1). — C'est encore le sulfure de potassium que M. Faraday a choisi, à cause de sa grande conductibilité, comme liquide actif de ses couples. L'appareil se compose (Fig. 224) d'une lame de platine P, et d'une lame D du métal à essayer. Ces deux lames, fixées aux extrémités du galvanomètre G, sont plongées en même temps dans une dissolution concentrée de sulfure de potassium contenu dans le vase V.

1° *Étain, plomb, bismuth.* — Quand la lame D est formée avec un de ces trois métaux, il se produit un cou-

(1) *Loc. cit.*, p. 124.

rant au moment de l'immersion ; la lame D joue le rôle de métal *positif* par rapport au platine. Au bout de très peu de temps, le courant commence à diminuer d'intensité, et l'aiguille du galvanomètre ne tarde pas à retomber à *zéro*. Si, alors, on examine la lame D, on voit que le métal a été attaqué, et qu'il est recouvert d'une couche

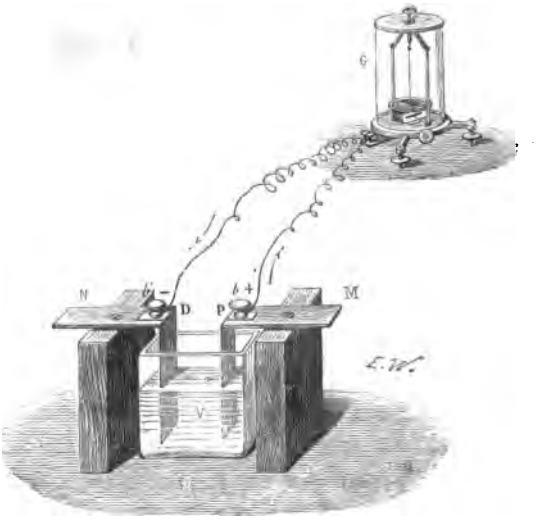


Fig. 224.

adhérente et *continue* de *sulfure*. L'expérience prouve, d'ailleurs, que de ces trois sulfures, le sulfure d'étain est seul *isolant*, tandis que les deux autres conduisent très bien l'électricité. Évidemment l'interposition de ces sulfures *adhérents* empêche le liquide d'agir sur le métal, et le dégagement d'électricité cesse du moment que la réaction chimique s'arrête. Le contact du plomb et du bismuth

métalliques avec leurs sulfures *conducteurs* ne développe donc aucune trace de force électromotrice.

2° *Cuivre, antimoine, argent.* — Quand on associe au platine l'un quelconque de ces trois métaux, l'aiguille du galvanomètre est déviée, et la lame D est *positive* par rapport au platine. Au bout d'un certain temps, l'intensité du courant diminue; mais l'aiguille ne retombe jamais à *zéro*, et l'*électricité continue à circuler*. Dans ce cas-ci comme dans le précédent, il se forme un sulfure sur la lame D ; mais, au lieu d'être adhérent, ce sulfure est poreux, cassant, se laisse facilement pénétrer par le liquide, parfois se sépare en écailles. Le métal ne cesse donc jamais d'être en rapport direct avec la dissolution de sulfure de potassium, et l'*action chimique n'est jamais complétement interrompue*. D'ailleurs, le sulfure de cuivre est, seul, conducteur d'électricité, les deux autres sont *isolants*.

3° *Zinc.* — Si D est une lame de zinc, la circulation d'électricité commence au moment de l'immersion, et le courant continue sans *affaiblissement*. Le zinc attaqué est, d'ailleurs, *positif* par rapport au platine. La continuité du courant tient à ce que, le sulfure de zinc étant soluble dans le liquide employé, la surface du zinc reste toujours nette, et l'action chimique conserve son intensité.

4° Dans une dissolution concentrée de sulfure de potassium, plongeons (Fig. 225) une lame C de cuivre, et une lame A d'argent préalablement fixées aux extrémités du fil d'un galvanomètre G. D'abord le cuivre *seul* est attaqué, la surface de l'argent reste parfaitement nette, et

le cuivre est *positif* par rapport à l'argent ; il s'établit un courant dirigé de la lame d'argent A à la lame de cuivre C à travers le fil du galvanomètre. L'accumulation du sulfure de cuivre sur la lame C affaiblit peu à peu l'action chimique et le courant. Tout à coup l'argent est

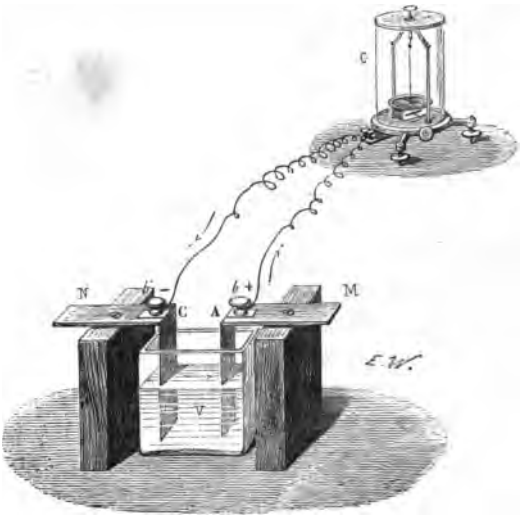


Fig. 225.

attaqué, sa surface se ternit, l'action chimique devient prédominante en A ; l'argent devient *positif* par rapport au cuivre, et le courant change de sens. Quelque temps après, le courant change de nouveau de sens, et le cuivre redevient *positif*. L'action chimique change ainsi plusieurs fois de côté, et avec elle le sens du courant, suivant que les circonstances favorisent la réaction du liquide sur l'un ou l'autre des deux métaux.

Il résulte évidemment de ces faits que, dans sa production comme dans son intensité et sa direction, la force électromotrice du couple voltaïque est indépendante du *contact* des substances hétérogènes, et prend sa source dans l'action chimique elle-même.

C. **Renversement du sens du courant.** — M. Faraday a rapporté beaucoup d'expériences desquelles il résulte que, dans une combinaison voltaïque, on peut renverser le sens du courant en conservant les mêmes métaux, et en changeant le liquide actif. Nous nous contenterons d'emprunter deux exemples à son tableau des métaux rangés suivant leur pouvoir électromoteur (1).

1° Dans l'acide azotique étendu, le plomb est *positif* par rapport à l'étain. Dans l'acide sulfurique étendu, l'étain est *positif* par rapport au plomb. Or, l'expérience démontre que l'acide azotique attaque plus fortement le plomb que l'étain, tandis que l'affinité de l'acide sulfurique est plus forte pour l'étain que pour le plomb.

2° Dans l'acide sulfurique étendu, l'antimoine est *positif* par rapport au cuivre. Dans l'acide chlorhydrique, le cuivre est *positif* par rapport à l'antimoine. Dans ce cas encore, le renversement du courant produit n'est que la traduction du changement survenu dans l'affinité des liquides pour chacun des métaux employés.

D. **Couples voltaïques actifs sans contact métallique.** — M. Faraday a donné (2) un très long tableau de combinaisons voltaïques qui fournissent un courant électrique

(1) *Loc. cit.*, p. 375.
(2) *Loc. cit.*, p. 379.

incontestable sans aucune espèce de *contact métallique*. Il nous suffira de citer ici les deux suivantes :

1° Soient P (Fig. 226) une lame de platine, et F une lame de fer plongeant, par leurs extrémités, dans les vases de verre M et N. Versons dans le vase M de l'acide azo-

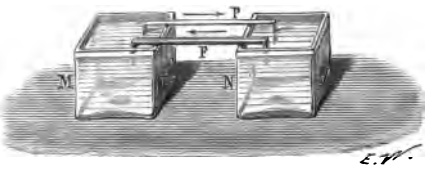


Fig. 226.

tique étendu, et dans le vase N une dissolution de sulfure de potassium. Cette combinaison voltaïque ne contient aucun *contact métallique*. Cependant, par le fait de l'*action chimique* de l'acide azotique sur le fer, ce métal devient *positif* par rapport au platine ; le système entier est traversé par un courant électrique dirigé de la lame F à la lame P dans le liquide actif du vase M, et assez puissant pour décomposer le sulfure de potassium dans le vase N.

2° Tout étant disposé de la même manière, remplaçons la lame de fer F par une lame de zinc, et le sulfure de potassium du vase N par une dissolution d'iodure de potassium. Cette seconde combinaison ne contient pas non plus de *contact métallique* auquel on puisse rapporter le développement de la force électromotrice. Tout se passe comme la théorie chimique permet de le prévoir ; sous l'influence de l'acide azotique, le zinc devient *positif* par rapport au platine, et le courant développé

est assez intense pour décomposer l'iodure de potassium dans le vase N.

Précédé dans cette voie par M. Becquerel et M. De La Rive qui avaient publié beaucoup d'observations tendant à établir que, dans la pile voltaïque, l'action chimique est la principale et même la seule cause du développement d'électricité, M. Faraday a pénétré plus profondément que tous ses devanciers dans le cœur de cette grande question. Par la netteté, la simplicité et le grand nombre des preuves expérimentales qu'il renferme, le travail du savant physicien anglais est une réfutation complète de la théorie du *contact métallique*, en même temps qu'une démonstration définitive et incontestable de la *théorie chimique* du couple voltaïque. Nous sommes donc en droit de dire avec M. Faraday (1) :

a. L'action chimique dégage de l'électricité.

b. Le courant s'établit au moment où l'action chimique commence, et dure aussi longtemps qu'elle.

c. Le courant s'affaiblit toutes les fois que l'intensité de l'action chimique diminue, le courant s'arrête en même temps que l'action chimique.

d. Le sens du courant change en même temps que le sens de l'action chimique.

e. Toute variation survenue dans l'intensité, ou le sens de l'action chimique s'accompagne nécessairement d'une variation correspondante dans l'intensité, ou le sens du courant.

f. En l'absence d'action chimique, le couple voltaïque ne fournit pas de courant.

(1) *Loc. cit.*, p. 381.

Ces propositions ne sont qu'une déduction naturelle et rigoureuse des belles expériences de M. Faraday; elles prouvent, dans leur ensemble, que le *contact* des métaux hétérogènes n'est pour rien dans les phénomènes de la pile voltaïque, et que tout doit être rapporté à l'action chimique.

En terminant cette longue discussion, nous devons rapporter une expérience très ingénieuse de Peltier (1); elle démontre, d'une manière évidente, que, dans le couple voltaïque, l'action chimique est la véritable source de l'électricité dynamique. Les vases A et B (Fig. 227) contiennent

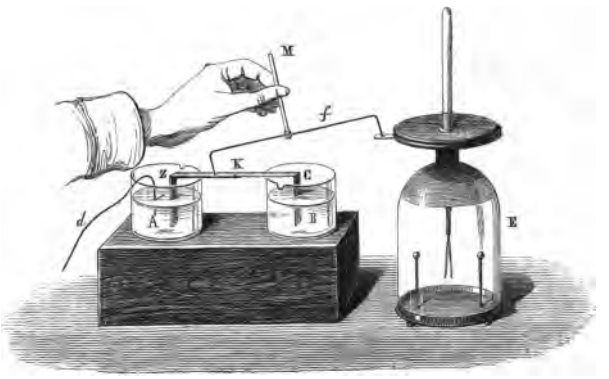


Fig. 227.

de l'acide sulfurique étendu. Z et C sont deux lames métalliques, l'une de zinc, et l'autre de cuivre, soudées par leurs extrémités. Un fil de platine *d* établit la communication du liquide du vase A avec le sol. Si le *contact* des

(1) De La Rive, *Traité d'électricité*, t. II, p. 783.

deux lames métalliques au point K produit l'électricité, la lame Z et le liquide du vase A doivent être à *zéro*, la lame C et le liquide du vase B doivent avoir une tension *négative*. Au moyen d'un fil de platine *f* tenu par un manche isolant M, on établit la communication des divers points de cet appareil avec le plateau inférieur d'un électroscope condensateur E dont on touche le plateau supérieur pour le faire communiquer avec le sol. On trouve le liquide du vase A à *zéro*, mais la lame Z, la lame C et le liquide du vase B sont *négatifs tous les trois* et *à la même tension*. — Changeons le fil *d* de place, et mettons-le dans le vase B ; alors, le liquide du vase A est isolé, et le liquide du vase B communique avec le sol. Dans la théorie du contact, le liquide B et la lame C devraient être à *zéro*, la lame Z et le liquide du vase A devraient être *positifs*. Or, en mettant de nouveau les divers points du système en communication avec l'électroscope, l'expérience montre que le liquide du vase B, la lame C et la lame Z sont *tous les trois* à *zéro ;* le liquide du vase A est *seul positif*. Cette expérience prouve que le siége du dégagement de l'électricité est à la surface de contact du liquide acide et de la lame de zinc, et que la cause de son développement est l'action chimique du liquide acide sur le métal.

DU COUPLE ET DE LA PILE VOLTAÏQUES.

Des faits précédemment établis, il résulte que :

1° Deux conducteurs quelconques qui n'exercent pas d'action chimique l'un sur l'autre, et qui se touchent, se

mettent nécessairement en équilibre de tension électrique.

2° A la surface de contact de deux conducteurs quelconques réagissant chimiquement l'un sur l'autre, il se développe une *force électromotrice*. La couche d'action chimique est le siége de cette force qui persiste autant que l'action chimique elle-même.

3° Deux conducteurs qui agissent chimiquement l'un sur l'autre sont nécessairement dans des états électriques opposés. La *différence algébrique de leurs tensions* dépend de l'intensité de la force électromotrice et lui sert de mesure.

Dans un couple hydro-électrique, composé d'un liquide actif placé entre deux métaux dont un seul est attaqué, la *force électromotrice* n'est qu'un mode de manifestation de l'*affinité chimique* des éléments en présence. Tant que la nature et l'intensité *spécifique* des actions chimiques restent les mêmes, c'est-à-dire tant que les métaux et les liquides ne changent pas et qu'aucune variation ne survient dans les circonstances extérieures qui peuvent modifier l'*affinité*, la force électromotrice du couple reste constante. Si, au contraire, l'affinité est modifiée par un changement survenu dans la nature des éléments en présence, ou par toute autre cause, la force électromotrice éprouve des variations correspondantes et de même sens. Quant à l'étendue des surfaces métalliques en contact avec les liquides, il est facile de comprendre qu'elle ne peut exercer aucune influence sur la force électromotrice. En effet, bien que la *quantité absolue* du métal dissous augmente avec l'étendue de la surface immergée, cependant, tant que le liquide et le métal restent les mêmes et sont placés dans

les mêmes circonstances, l'action chimique rapportée à l'unité de surface ne change pas de valeur, l'intensité *spécifique* de la réaction ou l'*affinité* qu'elle traduit ne varie pas; c'est donc toujours la même *différence de tension* qui doit s'établir entre le liquide et le métal attaqué dans toute l'étendue de la surface de contact. Dans un couple voltaïque quelconque, la force électromotrice est donc complétement indépendante de l'étendue des surfaces métalliques immergées, et n'est influencée que par les circonstances qui font varier l'affinité. M. Faraday, dans la partie de son beau travail consacrée à l'étude de l'influence de la température et de la dilution des liquides actifs sur la puissance électrique de l'action chimique (1), a démontré d'une manière incontestable l'exactitude des considérations précédentes. Il résulte, en effet, de ses expériences, que toujours la force électromotrice du couple et l'affinité de ses éléments varient dans le même sens.

Mais, si la force électromotrice du couple reste indépendante de l'étendue des surfaces métalliques immergées, il n'en est pas de même de la quantité d'électricité mise en liberté. En effet, d'une part, nous savons que la tension d'une surface conductrice est proportionnelle à l'épaisseur de la couche électrique qui la recouvre; d'autre part, nous venons de voir que, dans deux couples de même nature et de dimensions différentes, les éléments métalliques acquièrent des tensions égales. Il en résulte nécessairement que la quantité d'électricité mise en liberté par la force électromotrice varie proportionnellement à

(1) *Archives de l'électricité*, 1841, t. I, p. 342 et suiv.

l'étendue des surfaces métalliques attaquées par le liquide.

Lorsque les lames métalliques de la combinaison voltaïque sont toutes deux attaquées par le liquide interposé, il se développe évidemment deux forces électromotrices de *sens contraires*, et la force électromotrice *finale* du couple est la *résultante* ou la *différence* de ces deux forces *partielles*. Il peut se présenter deux cas :

1° *L'affinité du liquide est plus forte pour l'un des deux métaux que pour l'autre.* — D'après ce que nous avons dit, ces deux forces électromotrices *partielles* et de *sens inverses* ne sont pas égales; la plus considérable est du côté du métal le plus fortement attaqué. Par conséquent, dans cette combinaison voltaïque, le métal le plus attaqué joue le rôle d'élément *positif*, et le métal le moins attaqué se conduit comme un élément *négatif*.

2° *L'affinité du liquide est la même pour les deux métaux.* — Dans ce cas, les deux forces électromotrices sont *contraires et de même intensité;* leur différence est égale à *zéro*. Par conséquent, le *repos électrique* n'est pas troublé; il n'y a pas la moindre trace de courant dans le circuit fermé de cette combinaison voltaïque. On peut facilement vérifier l'exactitude de cette déduction théorique, en plongeant à la fois dans de l'acide sulfurique étendu d'eau deux lames de zinc fixées aux extrémités du fil d'un galvanomètre. Si les deux surfaces immergées ont la même étendue et sont dans les mêmes conditions physiques, l'aiguille du galvanomètre reste à *zéro*.

Cependant si, dans cette expérience, la surface immergée de l'une des lames de zinc l'emporte beaucoup sur celle de l'autre lame, il se développe un courant électrique, et la lame

la plus étendue se conduit comme un métal *positif* par rapport à l'autre lame de *même nature*, mais de *moindre surface*. Ce résultat n'est pas en contradiction avec les principes posés plus haut ; c'est tout simplement un cas particulier de ces nombreux phénomènes dans lesquels, même contrairement aux lois connues de l'affinité, l'action chimique atteint un plus haut degré d'intensité du côté où existe une prédominance notable dans la *masse* de matière *attaquable*.

Soit V (Fig. 228) un vase de verre dans lequel plongent une lame de zinc Z et une lame de cuivre C. Mettons

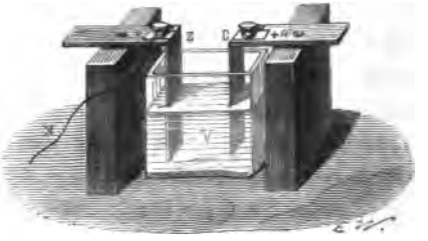


Fig. 228.

le zinc en communication avec la terre, à l'aide d'un conducteur quelconque N, et versons de l'acide sulfurique étendu d'eau dans le vase de verre. Le liquide dissout le zinc, et n'exerce aucune action sur le cuivre. A la surface de contact de l'acide et du zinc, il se développe une force électromotrice dont l'intensité est capable de déterminer et de maintenir, entre les éléments métalliques de ce couple, une différence constante de tension que nous supposons égale à + 10.

Au moment où l'action chimique commence, la force

électromotrice entre en jeu, accumule de l'électricité *positive* sur la lame de cuivre C, et repousse une quantité *égale* d'électricité négative du côté de la lame de zinc Z. Cette électricité négative s'écoule dans le sol à travers le conducteur N; par conséquent, la lame de zinc Z reste forcément à *zéro*, et la tension positive de la lame de cuivre C augmente jusqu'à ce qu'elle ait atteint le chiffre + 10. Dans cet état électrique du couple, la différence des tensions des lames métalliques est égale à + 10, la force électromotrice est satisfaite, et tout est en équilibre; l'action chimique s'arrêterait donc nécessairement, et les métaux conserveraient indéfiniment leurs tensions, si l'appareil n'éprouvait aucune perte d'électricité. Mais le contact de l'air détermine un affaiblissement incessant de la tension *positive* de la lame de cuivre C. Dès lors, le liquide acide continue à dissoudre le zinc, et la force électromotrice, inséparable de l'action chimique, continue à séparer des *quantités égales* de fluides de *noms contraires;* l'électricité *négative* s'écoule dans le sol à travers la lame de zinc Z et le conducteur N, la *positive* s'accumule sur la lame de cuivre C, répare les pertes occasionnées par le contact de l'air, et maintient *constante* la *différence* de tension des éléments du couple.

Supprimons la communication de la lame de zinc Z avec le sol. Au moment où le couple est complétement isolé, le zinc est à *zéro* et le cuivre à + 10; la différence des tensions des éléments métalliques est + 10; la force électromotrice est satisfaite. Mais l'électricité *positive* de la lame de cuivre C s'écoule à travers l'air ambiant, et la différence des tensions tend à diminuer. Dans ce couple

isolé, le liquide acide continue donc à agir sur le zinc, et la force électromotrice accumule, sur les éléments métalliques C, Z, des quantités d'électricité positive et d'électricité négative *égales* et suffisantes pour maintenir *constante* la différence algébrique de leurs tensions. Il est facile de voir que le zinc Z, ne communiquant plus avec le sol, prend lui-même une tension *négative* dont la valeur absolue est d'abord plus faible que celle de la tension *positive* du cuivre C. A partir de ce moment, l'air enlève de l'électricité aux deux extrémités de l'appareil ; le couple perd de l'électricité *positive* par la lame de cuivre C, et de l'électricité *négative* par la lame de zinc Z. Ces pertes, d'ailleurs, sont proportionnelles aux valeurs absolues des tensions ; elles sont donc plus fortes du côté du cuivre que du côté du zinc. Et, comme, dans le mouvement électrique déterminé par la force électromotrice pour maintenir *constante* la différence algébrique des tensions polaires, des quantités *égales* de fluides de noms contraires sont accumulées sur les lames métalliques, il en résulte nécessairement que la tension *positive* du cuivre s'affaiblit graduellement, tandis que la valeur absolue de la tension *négative* du zinc augmente. Au milieu de ces variations simultanées et de sens inverses, la différence algébrique des tensions des éléments du couple reste *constante*, et ces tensions *opposées* finissent par être égales en valeur absolue. La lame de cuivre C est alors à + 5, et la lame de zinc Z à — 5 de tension (Fig. 229).

Sous la double influence de l'action de la force électromotrice et des pertes occasionnées par le contact de l'air, il s'établit, dans le couple isolé, un mouvement *continu*

d'électricité dont le résultat est cette transformation des tensions de ses éléments métalliques. Le tableau suivant

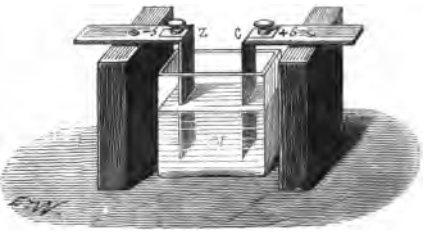


Fig. 229.

indique les principales phases de ce phénomène ; il montre par quelle série d'*états intermédiaires* passe le couple isolé avant d'atteindre son *état électrique définitif*.

	Z	C	Différence algébrique des tensions.
État électrique primitif du couple isolé	0	+10	+ 10
États électriques intermédiaires du couple isolé	— 1	+ 9	+ 10
	— 2	+ 8	+ 10
	— 3	+ 7	+ 10
	— 4	+ 6	+ 10
État électrique définitif du couple isolé	— 5	+ 5	+ 10

Tant que le couple isolé n'a pas atteint son *état électrique définitif*, l'écoulement par l'air et l'action de la force électromotrice se combinent de telle manière que, si l'un des deux éléments métalliques perd une certaine quantité d'électricité, l'autre élément gagne instantanément une quantité *égale* d'électricité de nom contraire. Ainsi, les valeurs absolues des tensions des éléments mé-

talliques du couple isolé peuvent varier sans que leur *différence algébrique* cesse de rester *constante*.

Lorsque la distribution des tensions est telle que l'indique la figure 229, le couple isolé est dans un état *définitif d'équilibre mobile*. En effet, d'une part la différence algébrique + 10 des tensions contraires de ses éléments métalliques est égale à l'intensité de la force électromotrice, et d'autre part les pertes éprouvées par les extrémités

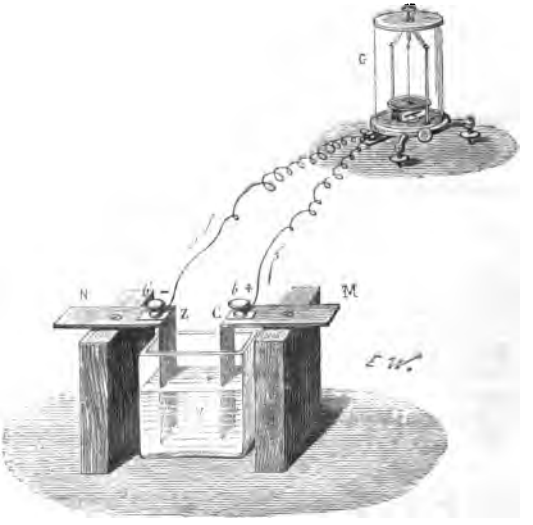


Fig. 230.

polaires sont égales. Par conséquent, l'action chimique et la force électromotrice n'entrent en jeu que pour réparer ces pertes, et maintenir *constantes* les valeurs absolues de la tension positive de la lame de cuivre C et de la tension négative de la lame de zinc Z.

Cela posé, établissons (Fig. 230) une communication métallique entre le cuivre C et le zinc Z du couple. Les tensions polaires se neutralisent à travers l'arc conducteur, et la force électromotrice les rétablit *instantanément*. Ce double mouvement, qui dure aussi longtemps que l'action chimique du liquide acide sur le zinc, produit un courant électrique continu dirigé du cuivre au zinc à travers l'arc conducteur, et du zinc au cuivre à travers le liquide du couple.

Après cette analyse des phénomènes déterminés dans un couple par l'action de la force électromotrice, il nous sera facile de comprendre comment s'établit la répartition des tensions électriques sur les divers éléments d'une pile en communication avec la terre par un de ses pôles, et d'une pile isolée par ses deux extrémités.

Soit V (Fig. 231) un premier couple voltaïque dont le zinc Z, en communication avec le sol par l'intermédiaire du conducteur N, est maintenu à *zéro;* le cuivre C est

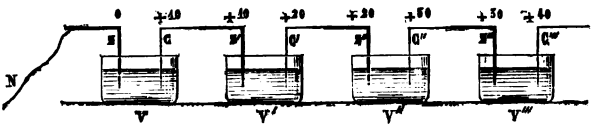


Fig. 231.

nécessairement à + 10. A ce cuivre C soudons une lame de zinc Z'. Ce zinc se met nécessairement en équilibre de tension avec la lame de cuivre. La tension de C serait donc affaiblie si la force électromotrice ne déterminait pas, dans le premier couple V, un nouveau mouvement d'électricité en vertu duquel la double lame C Z'

reçoit assez de fluide positif pour conserver la tension + 10, tandis qu'une quantité *égale* de fluide négatif s'écoule dans le sol à travers la lame Z qui reste à *zéro*. — Complétons le second couple en versant du liquide acide dans le vase V′, et en ajoutant une seconde lame de cuivre C′. Puisque Z′ est à + 10, la force électromotrice de ce second couple refoule vers C′ une quantité d'électricité positive suffisante pour faire monter à + 20 la tension de cette lame de cuivre C′. La lame de zinc Z′ reçoit, il est vrai, une *égale* quantité d'électricité négative; mais cette électricité négative est neutralisée par le fluide positif que la force électromotrice du premier couple V repousse vers la lame C. De cette manière la double lame C Z′ conserve sa tension + 10, et tout est en équilibre dans ces deux couples. Soudons à la lame C′ une troisième lame de zinc Z″; ce nouveau zinc se met en équilibre avec la lame C′. Dans ce cas, les forces électromotrices des couples V′, V agissent en même temps pour réparer la perte qu'éprouve la lame C′, et les doubles lames C′ Z″, C Z′ conservent leurs tensions + 20 et + 10. — Complétons le troisième couple en versant du liquide acide dans le vase V″, et en ajoutant une troisième lame de cuivre C″. Le zinc Z″ de ce troisième couple étant à + 20, la force électromotrice accumule sur C″ assez d'électricité positive pour porter sa tension à + 30. En même temps, les forces électromotrices des couples V, V′ entrent en jeu; les doubles lames C Z′, C′ Z″ reçoivent par leurs extrémités opposées des quantités égales de fluides de noms contraires, la lame Z reste à *zéro*, les tensions des doubles lames C Z′, C′ Z″ sont maintenues à

+ 10 et + 20, la tension de la lame C″ est elle-même à + 30, et tout est en équilibre dans l'ensemble des trois couples V, V′, V″. — Le même raisonnement nous servirait à montrer que, dans le quatrième couple V‴, le zinc Z‴ reste à + 30 ou en équilibre électrique avec C″, tandis que la tension de la dernière lame de cuivre C‴ s'élève à + 40. Dans une série semblable d'un nombre quelconque d'éléments voltaïques, la tension s'élève donc à + 50 sur la lame de cuivre du *cinquième* couple, à + 60 sur la lame de cuivre du *sixième* couple, et ainsi de suite.

Dans la pile de quatre couples de la figure 231, le premier zinc Z, en communication avec le sol, reste toujours à *zéro*, les métaux hétérogènes en contact de deux couples successifs sont en équilibre de tension, tandis que la tension de chaque cuivre l'emporte de + 10 sur celle de la lame de zinc appartenant au même couple et dont elle est séparée par le liquide acide. La force électromotrice est donc satisfaite dans les diverses sections du système, et tout est en équilibre. Cependant, quand cette pile est abandonnée à elle-même, l'air enlève aux lames métalliques une partie de leur électricité; mais l'action chimique et la force électromotrice entretiennent, dans chacun de ses couples, un mouvement électrique suffisant pour réparer ces pertes, maintenir les tensions des éléments métalliques, et rétablir l'équilibre à mesure qu'il est troublé.

Supprimons la communication du premier zinc Z avec le sol. L'atmosphère enlève aux diverses lames métalliques de la pile des quantités d'électricité *proportionnelles*

aux valeurs absolues de leurs tensions. Le résultat inévitable de ces pertes serait d'affaiblir, dans chaque couple, la *différence algébrique* des tensions de ses éléments métalliques, si la force électromotrice n'entrait pas immédiatement en jeu. L'écoulement par l'air et l'action de la force électromotrice entretiennent, dans l'appareil tout entier, un mouvement *continu* d'électricité qui modifie graduellement l'état électrique de la pile tout en maintenant *constante*, et égale à + 10, la *différence algébrique* des tensions des éléments métalliques de chacun de ses couples. — Dans la région médiane de la pile, la tension s'affaiblit et tombe à *zéro*. — Dans la moitié de l'appareil terminée par la lame de cuivre C''', les tensions s'affaiblissent aussi, mais conservent toujours leur signe *positif*. — Dans l'autre moitié de l'appareil, les tensions s'affaiblissent d'abord, puis *changent de signe* et acquièrent des valeurs absolues graduellement croissantes. Au milieu de ces transformations, les lames métalliques extrêmes Z, C''' finissent par avoir des tensions *égales et de signes contraires;* la pile, alors, a atteint son *état électrique définitif* (Fig. 232).

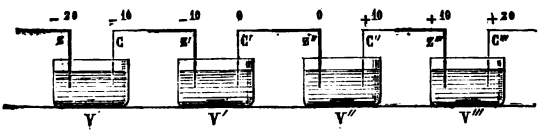


Fig. 232.

Le tableau suivant indique quelques-uns des *états intermédiaires* par lesquels passe la distribution des tensions des éléments métalliques de la pile isolée.

	État électrique primitif.	États électriques intermédiaires.			État électrique définitif.
1re lame de zinc Z....	0	— 5	—10	—15	—20
1re double lame CZ'...	+10	+ 5	0	— 5	—10
2e double lame C'Z''...	+20	+15	+10	+ 5	0
3e double lame C''Z'''..	+30	+25	+20	+15	+10
Dernière lame de cuivre C'''.....	+40	+35	+30	+25	+20
Différence algébrique des tensions de lames extrêmes Z, C'''.....	+40	+40	+40	+40	+10

Ce tableau montre qu'une pile isolée de *quatre* couples *égaux* se comporte comme un couple *unique*, isolé aussi, dont la force électromotrice serait *quadruple* de celle de chacun des couples de la série. Sous l'influence du mouvement *continu* d'électricité qu'entretiennent l'écoulement par l'air et l'action de la force électromotrice, le *zéro* de tension, placé d'abord sur la première lame de zinc Z, s'avance graduellement dans l'intérieur de l'appareil, et finit par atteindre la double lame métallique médiane C' Z''. Pendant que s'effectue ce déplacement du *zéro*, la *différence algébrique* des tensions des lames métalliques extrêmes Z, C''' reste *constante* et égale à + 40, c'est-à-dire à *quatre fois* la *différence algébrique* des tensions des éléments métalliques de chacun des couples de la série. En général, une pile de *m* couples *égaux* se conduit comme un couple *unique* dont la force électromotrice serait égale à *m fois* celle de chacun des couples ou éléments voltaïques associés.

Lorsque la distribution des tensions est telle que l'indique la figure 232, la pile est dans un *état définitif d'équi-*

libre mobile. En effet, d'une part, dans chaque couple, les différence algébrique des tensions des éléments métalliques est + 10; d'autre part, à partir de la région médiane qui est à *zéro*, les éléments métalliques situés symétriquement à droite et à gauche, ayant des tensions égales et de signes contraires, éprouvent des pertes égales. Par conséquent, quand la pile est parvenue à l'état représenté figure 232, l'action chimique et la force électromotrice n'entrent en jeu que pour réparer ces pertes, et maintenir *constantes* les valeurs absolues des tensions positives et négatives des divers éléments de l'appareil.

En résumé, il résulte des considérations précédentes que :

1° Lorsqu'une pile communique avec le sol par une de ses extrémités (Fig. 231), l'état électrique des lames métalliques est de même signe dans toute l'étendue de l'appareil, *positif* ou *négatif*, suivant que la communication avec la terre est établie par l'extrémité *zinc* ou par l'extrémité *cuivre*. A partir de la lame métallique en communication avec le sol, qui est nécessairement à *zéro*, la tension électrique augmente en *quantité absolue* dans les sections de la pile, à mesure qu'on se rapproche de l'extrémité isolée.

2° Dans une pile *isolée* (Fig. 232), la section médiane est à *zéro*; l'état électrique est *positif* dans toute la moitié de l'appareil qui correspond à l'extrémité *cuivre*, et *négatif* dans la moitié terminée par une lame de *zinc*. Deux sections prises à égale distance du milieu ont des tensions égales et de signes contraires dont la *valeur absolue* augmente, à mesure qu'on se rapproche des extrémités.

3° Que la pile soit *isolée* ou qu'elle communique avec le sol par une de ses extrémités, la *différence algébrique des tensions des lames métalliques* de l'un quelconque de ses couples est *constante* et égale à celle qui existerait dans cet élément voltaïque, s'il était séparé des autres.

4° Que la pile soit *isolée* ou qu'elle communique avec le sol par une de ses extrémités, la *différence algébrique des tensions polaires* est proportionnelle au nombre des couples rangés en série.

M. Biot (1) a mesuré, avec beaucoup de soin et dans des conditions diverses, la tension polaire d'une pile en communication avec le sol par une de ses extrémités. L'électricité était recueillie et accumulée sur un condensateur dont un des plateaux était mis en contact avec le pôle isolé, et la tension électrique était mesurée à la balance de torsion. Il résulte des observations de M. Biot que :

a. Dans une pile d'un nombre déterminé de couples composés du même liquide et des mêmes métaux, l'intensité de la tension polaire de l'extrémité isolée reste invariablement la même, quelle que soit l'étendue des surfaces métalliques employées. C'est la confirmation expérimentale de ce que nous avons dit plus haut de l'indépendance de la force électromotrice et de l'étendue des surfaces métalliques du couple.

b. Lorsque la nature des couples reste la même et que leur nombre seul varie, la tension polaire de l'extrémité isolée de la pile varie sensiblement en raison directe du nombre de couples qu'elle contient. Ainsi, pour deux piles

(1) *Traité de physique*, 1816, t. II, p. 488 et suiv.

composées, l'une de *vingt*, et l'autre de *seize* couples, le rapport des tensions polaires était 1,22, et, par conséquent, se confondait avec le rapport 1,25, des nombres de couples de ces piles. Cette expérience est une démonstration directe des principes qui servent de base à l'exposition précédente de la distribution de l'électricité dans la pile voltaïque.

Dans la pile isolée, c'est la *force électromotrice* qui trouble le repos électrique, détermine et maintient, sur ses extrémités polaires, un nouvel état d'équilibre des tensions. Lorsque les extrémités de la pile sont mises en communication par un corps conducteur quelconque, le circuit est *fermé;* alors les tensions polaires se neutralisent incessamment à travers l'arc conducteur, et la *force électromotrice*, dont l'activité est très grande, rétablit instantanément et maintient ces tensions polaires. Ainsi est produit et entretenu le courant électrique dirigé du pôle *cuivre* au pôle *zinc* dans l'arc conjonctif, et du pôle *zinc* au pôle *cuivre* dans la pile elle-même. Les phénomènes produits par le passage du courant électrique donnent des moyens, que nous exposerons dans le quatrième chapitre, de mesurer directement l'intensité de la force électromotrice d'un appareil électromoteur quelconque en activité. M. Kohlrausch (1) a successivement déterminé les tensions polaires d'un couple *isolé*, et la force électromotrice de ce même couple quand le circuit était *fermé*. Il a eu soin de faire varier tantôt la nature des éléments métalliques, tantôt la nature des liquides actifs des cou-

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1854, t. XLI, p. 357.

ples en expérience. Ses recherches établissent, avec un très grand degré d'exactitude, que la force *électromotrice* d'un couple *en activité* est *proportionnelle* à la *différence algébrique des tensions polaires* de ce même couple *isolé*. Ces résultats, rapprochés de ceux de M. Biot, prouvent donc d'une manière incontestable que :

Dans une pile composée de couples *égaux*, l'intensité de la force électromotrice est proportionnelle au nombre de ces couples, et égale au produit de ce nombre par l'intensité de la force électromotrice d'un des couples de la série.

ARTICLE III.

ACTIONS PHYSIQUES.

Quelques observations publiées par M. Becquerel (1) portent à penser que les *actions capillaires* peuvent développer une force électromotrice ; nous devons nous contenter de mentionner ces faits trop complexes et encore trop peu étudiés pour qu'il soit possible de démêler leur véritable signification. Nous réservant de consacrer un chapitre spécial à l'étude des courants produits par l'*induction électro-dynamique* et par l'*induction électro-magnétique*, nous fixerons ici exclusivement notre attention sur l'*action de la chaleur* considérée comme source de force électromotrice.

(1) *Traité de l'électricité et du magnétisme*, 1834, t. II, p. 94.

§ Ier. — Action de la chaleur sur les corps mauvais conducteurs. — Polarité électrique de la tourmaline.

Lémery (1) parle d'une tourmaline qui avait la propriété d'*attirer*, et puis de *repousser*, *après le contact*, les corps légers présentés à ses extrémités. Plus tard, Æpinus (2) constata que les propriétés de la tourmaline étaient dues à l'électricité, et que les deux extrémités du même minéral avaient toujours des charges de nature opposée. Non content d'avoir démontré la *polarité* de la tourmaline, ce physicien parvint à obtenir une étincelle en rapprochant, dans l'obscurité, un conducteur d'une des extrémités d'une tourmaline *échauffée*. Vers la même époque (1759), il communiqua à la Société royale de Londres un travail important sur les propriétés de la tourmaline; il montra que ce minéral ne prend la *polarité électrique* que quand sa température s'élève ou s'abaisse; il montra encore que, si l'on casse une tourmaline *polarisée*, chacun des fragments est aussi *polarisé*, avec cette particularité que les deux surfaces de la cassure représentent des *pôles électriques* de noms contraires.

M. Becquerel (3) a publié des observations intéressantes sur les propriétés électriques de la tourmaline. Il a constaté que ce minéral reste *neutre* tant que sa tempéra-

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1717, p. 7.

(2) *Mémoires de l'Académie de Berlin*, 1756, et *Recueil de mémoires sur la tourmaline*. Saint-Pétersbourg, 1762.

(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1828, t. XXXVII, p. 5 t 363.

ture est constante, et se *polarise*, au contraire, pendant qu'il s'échauffe ou se refroidit. Il a prouvé aussi que, dans un même échantillon, la disposition des *pôles* déterminée par l'élévation de température est *inverse* de celle que produit le refroidissement. Lorsqu'on échauffe une tourmaline, à une certaine température sa *polarité* se prononce et la *position des pôles* reste la même tant que la température est *ascendante*; dès que la température devient *stationnaire*, toute *polarité disparaît*. Au moment où le *refroidissement* commence, les *propriétés électriques* reparaissent, mais les *pôles* sont *renversés* et conservent cette *nouvelle position* tant que le minéral se *refroidit*, pour *disparaître* de nouveau quand de nouveau la température devient *stationnaire*. Les phénomènes précédents ne sont pas observés à tous les degrés de l'échelle thermométrique; la tourmaline ne se *polarise* qu'entre certaines limites de température, au-dessous et au-dessus desquelles elle perd son *état polaire* antérieur, reste insensible à l'échauffement comme au refroidissement, et conserve son *état neutre*. Dans les expériences de M. Becquerel, la *région moyenne* d'une tourmaline *polarisée* et *isolée* est toujours restée à l'*état neutre*. D'ailleurs, M. Becquerel n'a jamais pu parvenir à charger un condensateur très sensible avec une tourmaline *polarisée*: d'où il a conclu que ce minéral ne laisse pas échapper d'électricité, et n'en prend pas aux corps environnants.

Les propriétés de la tourmaline ont enfin été étudiées par M. Gaugain, dont le travail (1) a jeté un grand jour

(1) *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 1856, t. XLII, p. 1264.

sur les phénomènes de *polarité* de ce minéral. Il a d'abord déterminé les conditions nécessaires et suffisantes pour que l'électricité développée, dans une tourmaline, par une variation de température puisse se communiquer à un électroscope :

« Je suspends, dit-il, à deux supports isolants la tour-
» maline que je veux étudier, au moyen de deux fils fins
» de platine ou du cuivre enroulés sur les extrémités du
» cristal; puis, après avoir mis l'un de ces fils en commu-
» nication avec un électroscope à feuilles d'or ordinaire
» (voir fig. 27, page 63), et l'*autre fil en communication*
» *avec le sol*, j'échauffe la tourmaline d'une manière quel-
» conque, et la laisse ensuite refroidir à l'air libre. Si le
» cristal en expérience a été porté à une température très
» élevée, les feuilles d'or restent immobiles pendant quel-
» ques instants; mais, dès que la température de la tour-
» maline s'est abaissée au-dessous d'une certaine limite,
» elles commencent à diverger, s'écartent de plus en plus,
» finissent par atteindre les tiges métalliques destinées à
» les décharger, puis, après s'être dépouillées de l'électri-
» cité qu'elles possédaient, retombent dans la position
» initiale, pour diverger de nouveau. Ce mouvement se
» continue jusqu'à ce que le refroidissement soit complet,
» et le nombre des décharges effectuées peut mesurer avec
» assez d'exactitude la quantité d'électricité développée
» dans des conditions déterminées. Si l'on répète cette
» expérience, après avoir *supprimé la communication éta-*
» *blie entre le sol et la tourmaline, les feuilles d'or ne bou-*
» *gent pas*, ou, si elles divergent, leur angle d'écartement
» ne dépasse pas 5 à 6 degrés. »

D'ailleurs, la nature de la charge communiquée à l'électroscope dépend de l'extrémité du cristal, ou *pôle*, qui est en communication avec l'appareil.

M. Gaugain s'est assuré, par des expériences directes, que la *conductibilité* de la tourmaline, presque nulle à la température ordinaire, augmente rapidement à mesure qu'elle s'échauffe. Lorsque la température est assez haute pour que toute *polarité* du cristal disparaisse, sa conductibilité est telle qu'il décharge instantanément un électroscope électrisé mis, par son intermédiaire, en communication avec le sol. Ce dernier fait explique la disparition des signes électriques de la tourmaline aux températures élevées; en supposant, en effet, qu'à cette haute température le refroidissement développât de l'électricité, le fluide, au lieu de s'accumuler sur l'électroscope, s'écoulerait dans le sol à travers la tourmaline elle-même et le fil de communication, et les feuilles d'or conserveraient leur position initiale.

Dans une tourmaline *isolée*, les extrémités donnent *seules* des signes appréciables d'électrisation; il n'en est pas de même dans un cristal qui *communique avec le sol* par une extrémité. Dans ce dernier cas, la *partie moyenne* de la tourmaline est aussi *électrisée*, et, sur cette partie moyenne, la tension est de même signe que sur l'extrémité isolée.

M. Gaugain est parvenu à charger un condensateur, en mettant ses deux plateaux en communication avec les extrémités d'une tourmaline *isolée* et en voie de refroidissement. Les fragments d'un même cristal se conduisent comme le cristal tout entier. Parmi les fragments d'un

même cristal, les plus longs sont ceux qui fournissent le plus d'électricité, et la tourmaline entière en fournit toujours plus que chacun de ses fragments. La quantité d'électricité développée pendant que la température s'abaisse augmente donc avec la longueur du cristal lui-même, ou, en d'autres termes, avec le nombre des éléments dont il se compose.

Il résulte de ces faits que la tourmaline en voie de refroidissement se conduit comme un *électromoteur;* les surfaces terminales du cristal représentent les pôles de cette pile. La distribution des tensions dans un cristal isolé et dans un cristal communiquant avec le sol par une de ses extrémités, l'influence de la longueur sur la quantité d'électricité fournie, tout démontre que la *polarité* acquise par les tourmalines est le résultat de l'action d'une véritable *force électromotrice* développée sous l'influence des variations de température.

Voyant que la longueur des cristaux influe sur l'intensité des phénomènes produits, M. Gaugain a associé plusieurs tourmalines. Tantôt il a accouplé les cristaux en série, c'est-à-dire de manière à les réunir bout à bout par leurs *pôles de noms contraires;* tantôt il les a disposés en *batterie*, c'est-à-dire de manière à les faire tous communiquer par les *pôles de même nom.* Il résulte de ses expériences que, dans tous les cas, la tourmaline en voie de refroidissement se conduit comme une *pile sèche* qui oppose une très grande résistance à la circulation de l'électricité, et qui, dans un temps donné, ne peut fournir qu'une assez faible quantité d'électricité libre.

En opérant avec une *batterie* de quinze tourmalines

communiquant toutes par leurs pôles de même nom, M. Gaugain est parvenu à communiquer, à un petit carreau fulminant, des charges assez fortes pour produire des étincelles de 2 à 3 millimètres de longueur.

M. Gaugain (1) a communiqué, dans ces derniers temps, à l'Académie des sciences, deux nouvelles notes sur les propriétés électriques de la tourmaline. Dans ce dernier travail, il est parvenu à annuler toutes les pertes d'électricité provenant du contact de l'air et de l'isolement imparfait des supports. Il a trouvé ainsi que la *quantité totale* d'électricité développée par une tourmaline, qui se refroidit entre *deux limites* de température *données*, est *constante* et *indépendante de la vitesse* du refroidissement. De ce remarquable résultat, M. Gaugain a déduit cette loi extrêmement simple :

L'intensité électrique moyenne est directement proportionnelle à la vitesse de refroidissement moyenne.

Dans ce même travail, M. Gaugain a démontré que, contrairement à l'opinion généralement admise par les physiciens, la *quantité totale* d'électricité développée pendant le *réchauffement* est *toujours égale* à celle qui est produite pendant le *refroidissement*, lorsque la variation de la température de la tourmaline reste comprise entre *les mêmes limites* de l'échelle thermométrique.

La tourmaline ne jouit pas seule de la propriété de se *polariser* sous l'influence des variations de température. D'après les travaux de Haüy, beaucoup de cristaux qui

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1856, t. XLIII, p. 916 et 1122.

dérogent à la loi de symétrie prennent, sur leurs surfaces terminales, des tensions électriques de signes contraires pendant leur échauffement et pendant leur refroidissement.

Action de la chaleur sur les gaz. — M. Gaugain (1) a établi, dans un travail très intéressant communiqué à l'Académie des sciences, que, sous l'influence d'une élévation de température, une force électromotrice prend naissance dans un appareil composé de deux tubes de verre rapprochés au contact par leurs parties échauffées, et contenant deux fluides élastiques de nature différente.

M. Gaugain prend deux tubes de verre fermés par un bout : l'un est rempli d'*air*, l'autre contient *quelques gouttes* d'alcool. Dans chacun de ces tubes il introduit un fil de platine ; de ces fils, l'un communique avec le plateau supérieur d'un électroscope condensateur, l'autre avec le sol. Il rapproche les tubes par leurs extrémités fermées qu'il chauffe fortement avec une lampe à alcool, et il *touche avec le doigt* le plateau inférieur de l'électroscope. Le condensateur se charge d'électricité dans cette opération. La charge du plateau supérieur est *constamment positive* quand ce plateau communique avec le tube *plein d'air;* elle est *constamment négative* quand ce plateau communique avec le tube *plein de vapeur d'alcool*. Pour que l'expérience réussisse, il n'est pas nécessaire de continuer à chauffer les tubes pendant que l'un d'eux est en communication avec l'électroscope. On peut commencer par

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1853, t. XXXVII, p. 82, 584, 653.

élever la température des tubes en contact par leurs extrémités fermées, puis *éteindre* la lampe, et seulement alors compléter les communications ; les résultats sont les mêmes. Cette dernière manière d'opérer prouve que l'électricité recueillie n'est pas due à la *combustion de l'alcool* de la lampe.

En mettant les fils de platine en communication avec les extrémités du circuit d'un galvanomètre, M. Gaugain s'est assuré que le système des deux tubes précédents fournit, lorsqu'il est chauffé, un courant capable de dévier l'aiguille aimantée.

L'ensemble des deux tubes échauffés constitue donc un véritable *couple* électrique, dans lequel la vapeur d'alcool joue le rôle d'*élément électro-positif* par rapport à l'air. Le pôle *positif* du couple est, en effet, dans l'intérieur du tube plein d'air, et le pôle *négatif* dans l'intérieur du tube plein de vapeur d'alcool.

M. Gaugain s'est d'ailleurs assuré que le système de ces deux tubes jouit de toutes les propriétés d'un couple. Ainsi :

1° Il suffit d'*un temps très court* pour qu'il communique au condensateur le *maximum* de charge.

2° Une série de deux ou trois de ces couples, réunis par leurs pôles de noms contraires, communique au condensateur une charge électrique beaucoup plus forte qu'un seul couple.

M. Gaugain a successivement remplacé les fils de platine introduits dans les tubes par des fils d'or, d'argent, de cuivre, de fer ; les résultats ont toujours été les mêmes : le tube plein d'*air* a fourni de l'électricité *positive*, et le tube plein de *vapeur d'alcool* de l'électricité *négative* au

condensateur. Dans ce couple, les fils métalliques de communication jouent donc le rôle de simples conducteurs, et n'interviennent en aucune façon dans la production de la force électromotrice.

M. Gaugain a cherché à déterminer le rôle joué par chacun des deux fluides élastiques qui entrent dans la composition du couple. A cet effet, il a formé une série de couples gazeux en associant, deux à deux, des tubes de verre remplis d'*air*, d'*oxygène*, d'*azote*, d'*acide carbonique*, d'*hydrogène*, de *vapeur d'eau*, de *vapeur d'éther* et de *vapeur d'alcool*. Il résulte de ses expériences que :

1° Dans tous ces couples, l'oxygène et l'air jouent le rôle d'élément *électro-négatif*, par rapport à un autre fluide élastique quelconque de cette série; la force électromotrice développée agit toujours dans le même sens.

2° Si l'un des deux tubes associés ne contient pas de l'oxygène ou de l'air, le système est *inactif;* l'électroscope ne prend pas de charge sensible; il n'y a pas de *force électromotrice* développée.

3° Quand un des tubes contient de l'oxygène et l'autre de l'air, le système est également *inactif*. Dans ce cas, il y a développement de *deux forces électromotrices égales et de sens contraires*, qui, par conséquent, se neutralisent.

4° On peut introduire dans un des tubes un mélange d'oxygène et d'un autre quelconque de ces fluides élastiques. Si la proportion d'oxygène est considérable, ce mélange se conduit absolument comme l'air. Mais, si la proportion d'oxygène est très petite, d'*un centième* par exemple, le mélange joue le rôle d'élément *électro-positif* par rapport à l'air ou à l'oxygène pur, et d'élément *élec-*

tro-négatif par rapport à tous les autres fluides élastiques de la série précédente.

En définitive, il résulte de tous ces faits que, dans les couples gazeux découverts par M. Gaugain :

1° Les fils métalliques de communication, et les fluides élastiques autres que l'oxygène jouent le rôle de simples *conducteurs*.

2° Sous l'influence de l'élévation de température, une force électromotrice prend naissance à la surface de contact de l'oxygène et du verre; l'oxygène prend la *tension positive* et le verre la *tension négative*.

La circulation d'électricité dans ce couple est rendue possible par la diminution très considérable qu'éprouve, à cette haute température, le pouvoir isolant du verre.

§ II. — Action de la chaleur sur les métaux.

Les recherches de Seebeck, de Sturgeon, de Nobili, de MM. Becquerel, Matteucci, Wrède, etc., prouvent que la chaleur peut produire un courant électrique dans un circuit entièrement métallique. Pour introduire de l'ordre dans cette étude, nous considérerons successivement des circuits fermés composés d'un seul métal, et des circuits dans lesquels deux métaux hétérogènes sont associés.

A. **Circuits composés d'un seul métal.** — Les travaux récents de M. Magnus (1) ont fait connaître, mieux que ceux de ses prédécesseurs, les conditions au milieu des-

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1852, t. XXXIV, p. 105.

quelles la chaleur produit un courant électrique dans un circuit composé d'un seul métal. Pour que la variation de température ne pût pas altérer les conditions physiques des métaux, et surtout leur *dureté*, M. Magnus a eu soin, en général, de ne pas les chauffer au-dessus de 100 degrés. A cet effet, il s'est servi d'un appareil semblable à celui de la figure 233.

M représente un petit vase de fer-blanc traversé d'outre en outre par un tube de verre horizontal AB, dans

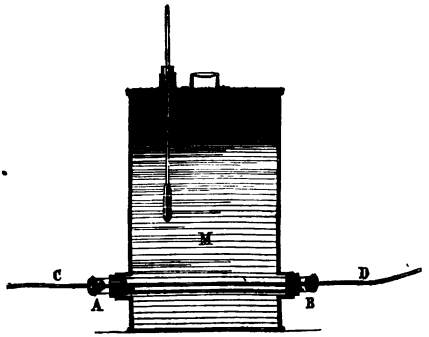


Fig. 233.

lequel est placée la partie CD du fil à essayer. Les extrémités du tube étant fermées avec des tampons de coton, on verse de l'eau dans le vase, et l'on chauffe jusqu'à l'ébullition. De cette manière, le fil métallique est chauffé à l'abri du contact de tout liquide et de tout conducteur métallique.

Les fils métalliques essayés par M. Magnus communiquaient, par leurs extrémités, avec un galvanomètre.

L'existence et le sens du courant étaient indiqués par la déviation de l'aiguille aimantée. Dans ses expériences, le diamètre des fils a varié de 1 à 5 millimètres, et leur longueur était au moins de 1^{m},30, afin de pouvoir les échauffer dans une portion de leur étendue sans que la chaleur se propageât aux points qui établissaient la communication avec le circuit du galvanomètre. D'ailleurs, toutes les précautions étaient prises pour maintenir bien exactement ces derniers points à la même température.

Cela posé, M. Magnus a constaté que l'échauffement d'un fil métallique *continu* ne donne lieu *à aucun courant* électrique, si son diamètre est uniforme, si sa surface est nette et dépouillée de toute couche d'oxyde, et si *sa dureté* est la même dans toute son étendue. Il a ensuite étudié l'influence de l'inégalité du diamètre, de l'état de la surface et de la différence de *dureté*.

Influence de la différence de diamètre. — Soit (Fig. 234) un gros fil de 1 mètre de longueur et de 7 millimètres de

Fig. 234.

diamètre qu'on a tourné de manière que, dans son milieu et dans une étendue de 13 millimètres, son épaisseur soit réduite à 1 millimètre. L'échauffement du fil aux points g, g ne produit *aucun courant* électrique. La variation de diamètre du fil est donc sans influence sur le développement de *courants thermo-électriques*. L'exacti-

tude de cette proposition est, d'ailleurs, démontrée par beaucoup d'autres expériences.

C'est ici le lieu de rapporter une autre expérience très intéressante de M. Magnus. Les tubes de verre AC, BD (Fig. 235) sont pleins de mercure; ils communiquent avec un galvanomètre par leurs extrémités A et B, au moyen de fils de platine passés à travers des bouchons de liége

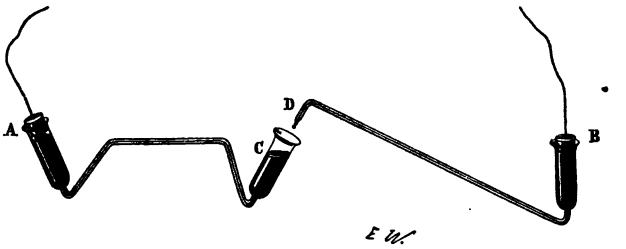


Fig. 235.

et plongés dans le mercure. Soit qu'on *chauffe* l'extrémité D pour la plonger dans le mercure *maintenu froid* du renflement C, soit, au contraire, qu'on *chauffe* le mercure du renflement C et qu'on y plonge l'extrémité D *maintenue froide*, le résultat est toujours le même : *il n'y a pas de courant produit*. Cette expérience se joint à la précédente pour montrer que la différence de diamètre n'exerce aucune influence sur la production des *courants thermo-électriques;* elle démontre aussi que le mercure se conduit comme les autres métaux, quand leur *dureté* est la même dans toute leur étendue.

Influence de l'état de la surface. — M. Magnus a expérimenté sur un fil métallique de *même dureté* dans toute son étendue, dont la surface était en partie *polie* et en

partie *dépolie;* il s'est assuré qu'une élévation de température, déterminée dans le voisinage du point où change l'état physique de la surface, ne produit *aucun courant* électrique. Il a obtenu le même résultat négatif en opérant sur des fils métalliques dont la surface était en partie recouverte de substances non conductrices, telles que le noir de fumée, la gutta-percha, le bois, etc. Les diverses sections transversales des fils ainsi préparés étaient nécessairement traversées par *des quantités inégales* de chaleur, puisque le pouvoir émissif d'une portion de leur surface était altéré. Ces expériences prouvent donc, contrairement à l'opinion adoptée par des physiciens d'un grand mérite, qu'une *différence* dans la propagation de la chaleur à droite et à gauche de la région chauffée n'est pas une condition suffisante pour donner naissance à un courant électrique.

Mais, quand on soumet à cette épreuve des fils dont la surface est en partie recouverte d'une couche d'oxyde, ou d'un dépôt galvano-plastique d'un *autre* métal, le courant électrique prend naissance avec une grande facilité sous l'influence de l'élévation de la température. M. Magnus pense, avec raison, que, dans ce dernier cas, l'apparition de l'électricité dynamique n'est pas due à la modification qu'a subie la surface des fils, mais à l'introduction de deux conducteurs hétérogènes dans le circuit.

Influence du changement de dureté du fil. — Pour cette étude, M. Magnus s'est servi tantôt de fils écrouis dont une partie avait été recuite, tantôt de fils entièrement recuits dont une partie avait été martelée. En chauffant ces fils dans les points voisins de la section qui séparait la partie

recuite de la partie *dure*, il obtenait constamment un courant électrique. Le courant changeait de sens et s'affaiblissait quand, au lieu de porter sur la partie *recuite*, l'échauffement portait sur la partie *durcie* par le passage à la filière ou par le martelage.

Le tableau suivant contient les résultats obtenus avec des fils de 1m,30 de longueur, *durcis* par le passage à la filière dans la moitié de leur longueur, et *recuits* dans l'autre moitié. On chauffait à 100 degrés la section de séparation de la partie *recuite* et de la partie *dure* :

Métal.	Sens suivant lequel le courant traverse la section chauffée.		Déviation du galvanomètre.
Laiton.....	de la partie recuite à la partie écrouie.		55°
Argent (1).....	—	—	46
Acier.....	—	—	45
Argent à 750 de fin.	—	—	40
Cadmium.....	—	—	25
Cuivre.....	—	—	18
Or n° 1 (2).....	—	—	10
Platine.....	—	—	5
Or n° 2 (3).... ..	—	—	2
Argentan.....	de la partie écrouie à la partie recuite.		34
Zinc.....	—	—	32
Étain.....	—	—	30
Fer.....	—	—	4
Plomb.....	sens douteux.....		0

Ces expériences démontrent qu'une inégalité de *dureté* dans les parties voisines du point sur lequel porte l'échauffement est la seule condition physique saisissable du développement d'un courant thermo-électrique, dans un

(1) Contenant 0,0087 de cuivre.
(2) Contenant 0,097 de cuivre.
(3) Contenant 0,021 d'argent.

circuit composé d'un seul fil homogène et *continu*. D'ailleurs, le sens suivant lequel le courant traverse la section de séparation des portions *inégalement dures* dépend de la nature du fil lui-même.

M. Magnus a prouvé que le courant thermo-électrique, observé dans ces dernières expériences, ne peut pas être attribué à une inégalité dans les quantités de chaleur propagées par la portion écrouie et la portion recuite du même fil. En effet, il a pris deux portions d'égale longueur coupées dans un même fil métallique ; l'une a été recuite, l'autre a été conservée écrouie. Après leur avoir donné le même degré de poli, il les a également échauffées par une de leurs extrémités, et il a constaté que la vitesse de propagation de la chaleur était la même dans la partie recuite et dans la portion écrouie.

M. Becquerel, dans ses recherches sur les courants thermo-électriques, a indiqué un procédé très simple pour obtenir un flux d'électricité dynamique dans un circuit composé d'un seul fil métallique *continu*. Après avoir fait *un nœud* sur un point de sa longueur, ou en avoir roulé une portion en spirale, on met les extrémités d'un fil de platine en communication avec un galvanomètre (Fig. 236). Il suffit, alors, de chauffer le fil avec la flamme d'une lampe à alcool, dans le voisinage du nœud ou de la spirale, pour que le galvanomètre indique l'existence d'un courant électrique dirigé, dans le fil de platine, de la partie chauffée au nœud ou à la spirale. M. Magnus pense que le courant obtenu dans cette expérience est dû à un changement moléculaire survenu dans la portion du fil plongée dans la flamme. Pour lui, cette portion de fil

chauffée *au rouge* par la flamme de la lampe joue, par rapport à la spirale ou au nœud, le rôle d'une portion *moins dure*, et le sens du courant est tel que les faits contenus dans le tableau précédent permettaient de le prévoir. M. Gaugain (1) interprète autrement ce phénomène. Le

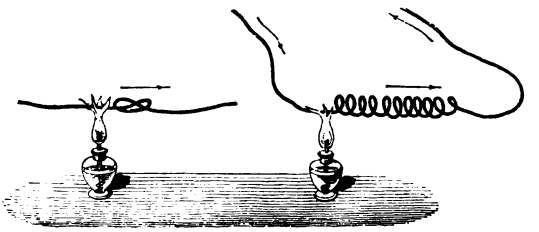


Fig. 236.

courant *manque*, dit-il, toutes les fois qu'il *n'y a pas de contact* entre deux spires consécutives de la spirale, et quand, dans le fil noué, les portions qui se croisent passent *sans se toucher*. D'après ce physicien, l'observation de M. Becquerel rentre donc dans les faits que nous allons exposer, et n'est qu'une forme particulière de l'expérience dans laquelle on produit un courant en mettant en contact deux fils *de même nature* et *inégalement* échauffés.

Association de deux fils métalliques de même nature. — M. Becquerel a montré qu'un circuit composé de deux fils de même nature peut devenir le siége d'un courant thermo-électrique. On met (Fig. 237) un long fil de platine en communication avec un galvanomètre G, puis on

(1) *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 1853, t. XXXVI, p. 615.

le coupe en son milieu et, avec ses extrémités libres, on forme deux spirales planes A et B. Après avoir chauffé la spirale A avec une lampe à alcool, on la dépose sur la spirale froide B; immédiatement l'aiguille du galvanomètre est déviée par un courant dirigé, à travers le fil de

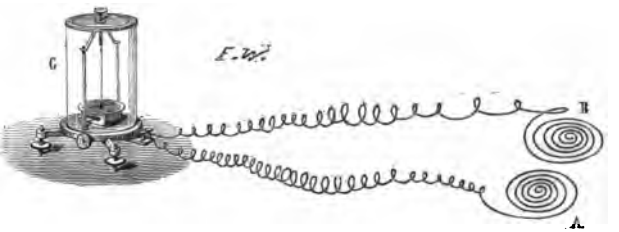


Fig. 237.

platine, de la spirale *chaude* A à la spirale *froide* B. Ce courant change de sens, quand on chauffe la spirale B et qu'on la dépose sur la spirale A maintenue à la température ambiante.

M. Magnus a étudié, avec beaucoup de soin, les courants thermo-électriques qui, dans un circuit métallique, prennent naissance au point de contact de deux fils de même nature pris au hasard et à la suite l'un de l'autre dans un même échantillon, et portés à des températures inégales. Nous nous contenterons de rapporter dans les tableaux suivants les résultats moyens de ses expériences. Les nombres inscrits dans ces tableaux expriment, en degrés, les arcs de déviation de l'aiguille du galvanomètre. Le signe + indique que le courant traverse la surface de contact en se dirigeant du fil *chaud* au fil

froid; le signe — indique un courant dirigé du fil *froid* au fil *chaud* à travers cette surface de contact.

Métal.	Les deux fils sont à la fois		L'un des fils est écroui et l'autre recuit.	
	Écrouis.	Recuits.	Le fil chaud est écroui.	Le fil chaud est recuit.
I. — *Température des fils, 8 et 100 degrés.*				
Argentan	— 40°	— 72°	— 5° + 24 *	— 80°
Argent fin	— 7	— 3	— 73	+ 68
Cuivre	— 3	— 7	— 24	+ 15
Étain	— 7	— 10	+ 7	— 20
Zinc	+ 28	+ 28	+ 62	— 34
Platine	+ 24	+ 22	+ 13	+ 36
Or n° 2	+ 5	+ 6	+ 3	+ 5
Or n° 1	+ 6	+ 5	+ 2 — 11 *	+ 19
Cadmium	+ 26	+ 15	— 53	+ 55
Laiton	+ 3	+ 12	— 90	+ 90
Argent à 750 de fin	+ 6	+ 12	— 82	+ 78
Plomb	douteux.	»	douteux.	»
II. — *Température des fils, 8 et 250 degrés.*				
Argent fin	— 20	— 17	— 92	— 3 + 90 *
Platine	+ 84	+ 80	+ 90	+ 90
Or n° 1	+ 17	+ 28	+ 12	+ 27
Or n° 2	+ 54	+ 31	+ 10 — 30 *	+ 69
Argent à 750 de fin	+ 90	+ 90	+ 6 — 90 *	+ 90

D'après les faits contenus dans ces deux tableaux, une *inégalité* de température est la seule condition nécessaire pour qu'un courant thermo-électrique prenne naissance

au point de contact de deux fils métalliques de même nature. En sorte que, dans un fil métallique *continu*, la section qui sépare la portion *recuite* de la portion *écrouie* peut être assimilée à la surface de contact des fragments d'un même fil coupé en deux.

Quant au sens suivant lequel le courant traverse la surface de contact des deux portions d'un même fil, rien ne peut le faire prévoir à l'avance : il change avec la nature du fil. La comparaison des résultats relatés dans les deux dernières colonnes des tableaux précédents montre en outre que, pour certains métaux, le sens du courant change en même temps que l'état de *recuit* ou *d'écrouissage* de la portion échauffée du circuit métallique homogène.

Nous avons marqué du signe * cinq expériences qui ont présenté ce résultat singulier que, *un instant* après l'établissement du contact entre les fils de température inégale, le sens du courant *a changé brusquement*. Le nombre supérieur indique le sens du courant qui s'est manifesté au moment où le contact a été établi, et la valeur de la déviation ; le nombre inférieur, toujours plus considérable que le précédent, correspond au courant définitif.

Si nous comparons l'irrégularité des résultats précédents à la simplicité des lois qui régissent le sens du courant développé sous l'influence de l'action chimique, il nous paraîtra évident que la *véritable condition* de la production des courants thermo-électriques est encore loin d'être connue.

Ici se place naturellement une observation faite par Seebeck et Sturgeon. Soit (Fig. 238) un rectangle d'an-

timoine fondu placé dans le plan du méridien magnétique, et sur lequel on a posé une aiguille aimantée. Si l'on promène le long de ce cadre la flamme d'une lampe à alcool, on trouve des points, tels que le point A, doués

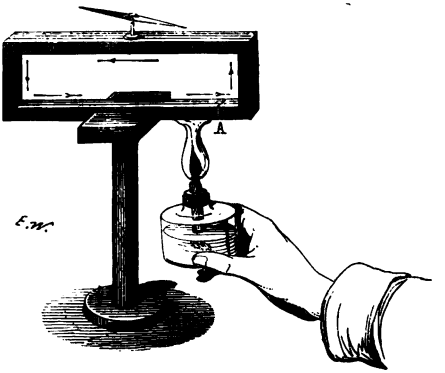


Fig. 238.

de propriétés particulières qui leur ont fait donner le nom de *points neutres*. Quand on chauffe le métal dans le voisinage d'un *point neutre*, l'aiguille aimantée accuse l'existence d'un courant électrique; ce courant change de sens quand la flamme change de côté par rapport au *point neutre*. Dans les rectangles d'antimoine, le courant thermo-électrique traverse *toujours* le *point neutre* de la partie *chaude* à la partie *froide*, ainsi que l'indique la figure 238.

Les rectangles de bismuth fondu ont aussi des *points neutres;* mais, avec ce dernier métal, le courant thermo-électrique traverse *toujours* le *point neutre* de la partie *froide* à la partie *chaude*.

M. Matteucci, qui a publié un travail spécial sur ce sujet (1), fait observer que ces *points neutres* ne se rencontrent jamais dans les portions des rectangles ou des prismes de bismuth et d'antimoine qui ont été refroidis lentement, et dont la cristallisation est régulière. Au contraire, les *points neutres* se rencontrent dans les portions où la cristallisation du métal a été troublée soit par un refroidissement trop brusque, soit par toute autre cause. L'observation lui a montré que les *points neutres* correspondent à des tranches dont la cristallisation est confuse et différente de celle du reste du métal. Il a, ainsi, été conduit à assimiler la *section* ou le *point neutre* à une solution de continuité dans la masse métallique, les portions situées à droite et à gauche se conduisant l'une par rapport à l'autre comme deux fils de même nature et inégalement chauffés.

B. **Circuits composés de deux métaux.** — Seebeck, le premier, a observé que, deux fils ou deux barreaux métalliques de nature différente étant soudés par leurs extrémités de manière à former un circuit complet, il suffit que les deux soudures présentent une inégalité de température pour qu'un courant thermo-électrique prenne naissance. L'appareil suivant (Fig. 239) démontre ce fait pour un cas particulier.

BB′ est un prisme de bismuth aux extrémités duquel est soudée une lame recourbée de cuivre CC′. On met ce cadre métallique dans le plan du méridien magnétique, et sur le prisme BB′ on place une aiguille aimantée.

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1838, t. XVIII, p. 353.

L'une des soudures B, B' étant à la température de l'air ambiant, on chauffe l'autre avec une lampe à alcool; immédiatement l'aiguille aimantée est déviée. Le courant

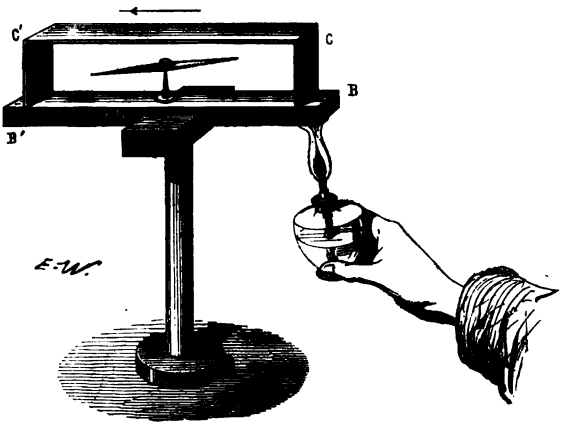


Fig. 239.

change de sens, quand on transporte la lampe d'une soudure à l'autre; dans le cas du bismuth et du cuivre, le courant traverse *toujours* la soudure échauffée en marchant du bismuth au cuivre.

Des courants du même genre peuvent être obtenus avec un circuit formé par l'association de deux métaux quelconques. Ainsi, si l'on met un galvanomètre en communication avec les extrémités de deux fils métalliques de nature différente dont les bouts libres sont soudés ou fortement appliqués l'un contre l'autre, il suffit de chauffer le point de jonction pour que l'aiguille du galvanomètre soit déviée. Le sens suivant lequel la surface de

jonction est traversée par le courant dépend de la nature des métaux employés.

Pour classer les différents métaux d'après leur tendance à prendre la tension positive ou la tension négative, M. Becquerel s'est servi d'un circuit composé de fils de nature différente. Il chauffait successivement chacune des soudures à 20 degrés pendant que toutes les autres étaient maintenues à *zéro*. Le sens du courant développé dans chaque essai indiquait l'état électrique relatif qu'un métal quelconque prenait par rapport aux autres. De ses recherches et de celles de divers observateurs, il résulte que les métaux se placent dans l'ordre suivant :

Bismuth,	**Argent,**	**Or,**
Nickel,	**Etain,**	**Zinc,**
Platine,	**Plomb,**	**Fer,**
Palladium,	**Rhodium,**	**Arsenic,**
Cobalt,	**Laiton,**	**Antimoine.**
Manganèse,	**Cuivre,**	

Dans cette série, un métal quelconque prend la *tension négative* par rapport à tous ceux qui le suivent et la *tension positive* par rapport à tous ceux qui le précèdent. En d'autres termes, deux métaux quelconques de la série étant accouplés, la surface de jonction échauffée est traversée par un courant dirigé du métal qui occupe le rang le plus élevé à celui qui est placé dans un rang inférieur. En adoptant le langage employé dans l'étude du couple voltaïque, on peut encore dire que, dans cette série, un métal quelconque est *positif* par rapport à tous ceux qui le suivent, et *négatif* par rapport à tous ceux qui le précèdent.

DU COUPLE ET DE LA PILE THERMO-ÉLECTRIQUES.

De tous ces faits il résulte que la surface de jonction de deux barreaux métalliques de nature différente devient, sous l'influence d'une élévation de température, le siége d'une *force électromotrice*, qui les constitue et les *maintient* dans des états électriques opposés. Lorsque les extrémités libres de ces barreaux sont mises en communication, les *tensions* sont incessamment neutralisées à travers l'arc conducteur et *instantanément* reproduites par la *force électromotrice;* le système entier est, ainsi, traversé par un courant continu d'électricité. Dans l'état actuel de la science, les véritables causes du développement des phénomènes thermo-électriques ne sont pas encore assez bien connues pour qu'il soit possible d'en faire la théorie générale. Pour le moment, nous devons accepter *l'inégalité de température* des diverses parties d'un circuit métallique comme une source incontestable d'électricité dynamique, et nous occuper des dispositions adoptées dans la construction des piles thermo-électriques.

Soient ABD (Fig. 240) un cylindre de bismuth, et C, C′ deux gros fils de cuivre soudés à ses extrémités. Plongeons la soudure A dans un bain d'eau bouillante V, pendant que la soudure D est placée dans un vase plein de glace fondante V′. En raison de la différence de température des deux soudures, il se développe, en A, une force électromotrice qui constitue le fil de cuivre C et le cylindre de bismuth dans des états électriques opposés;

quant au fil de cuivre C′, il prend la même tension que le bismuth. Si donc la *différence algébrique* de tension nécessairepour faire équilibre à la force électromotrice est égale à + 10, un raisonnement identique avec celui de la

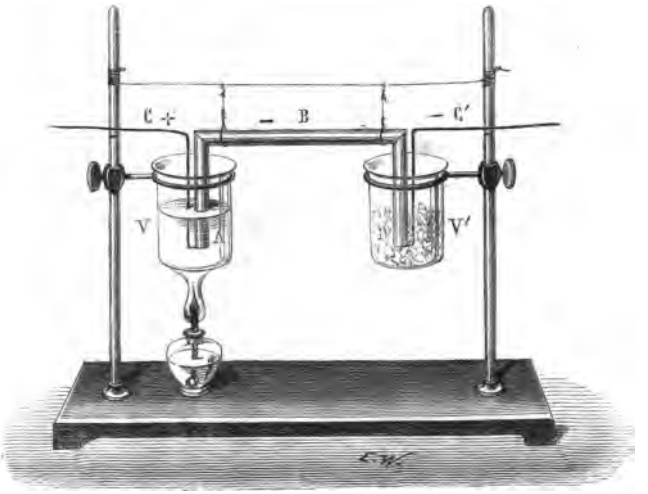


Fig. 240.

page 418 prouve que le fil de cuivre C doit monter à + 5 tandis que que le fil de cuivre C′ tombe à — 5. D'ailleurs, cette différence de tension persiste tant qu'est maintenue la différence de température des soudures sous l'influence de laquelle s'est développée la force électromotrice. Cet appareil est évidemment un véritable couple thermo-électrique.

Dans le couple thermo-électrique, les conditions déterminantes de la production de la force électromotrice

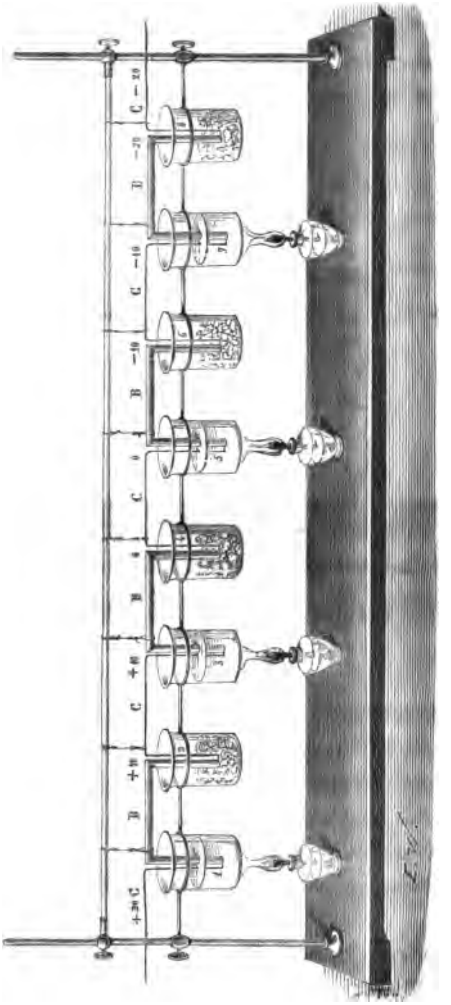


Fig. 241.

sont, d'une part *l'hétérogénéité* des métaux, et d'autre part *la différence* de température des deux soudures. Pour une même différence de température, la force électromotrice développée est d'autant plus considérable que les métaux accouplés sont placés plus loin l'un de l'autre dans la série de la page 455. Pour les mêmes métaux, nous verrons plus tard que la force électro-motrice est, dans certaines limites, directement proportionnelle à la différence de température des deux soudures; mais cette loi n'est pas générale et ne se vérifie pas dans toute l'étendue de l'échelle thermométrique. Dans beaucoup de circonstances, en effet, il suffit que la température de la soudure chaude dépasse un certain degré pour que le courant s'affaiblisse et même change de sens. Quant à l'étendue des surfaces de contact des métaux hétérogènes, elle joue le même rôle que les dimensions des lames métalliques immergées dans le couple hydro-électrique; elle ne peut, par conséquent, exercer aucune influence sur l'intensité de la force électromotrice.

Soient maintenant (Fig. 241) une série de cylindres de bismuth B, B, B, B soudés par leurs extrémités à des fils de cuivre C, C, C, C, C. Disposons l'appareil de manière que toutes les soudures de rang impair 1, 3, 5, 7 plongent dans un bain d'eau bouillante, tandis que les soudures de rang pair 2, 4, 6, 8 sont placées dans la glace fondante. Dans cette série, chaque cylindre de bismuth avec ses deux soudures maintenues à des températures différentes représente un couple complet, les couples successifs agissent tous dans le même sens, et la série entière est une véritable pile thermo-électrique. Si la force

électromotrice est assez puissante pour maintenir une *différence algébrique* de tension égale à + 10 entre les métaux de chaque couple, nous trouverons, en raisonnant comme à la page 423, que l'état d'équilibre de cette pile isolée de quatre couples correspond à la distribution des tensions indiquée dans la figure 241. En effet, autour de chaque soudure échauffée les métaux ont acquis des tensions dont la différence algébrique est + 10, et la tension des métaux est la même autour de chaque soudure refroidie. De ces considérations, il résulte que :

1° La distribution des états électriques définitifs dans une pile thermo-électrique est la même que dans une pile voltaïque ;

2° Dans une pile thermo-électrique, comme dans une pile voltaïque, la différence algébrique des tensions polaires est proportionnelle au nombre des couples rangés en série.

Lorsque les extrémités de la pile thermo-électrique sont mises en communication, il est évident que les tensions polaires se neutralisent incessamment à travers l'arc conducteur, et sont instantanément reproduites par la force électromotrice. Il s'établit, ainsi, un courant continu d'électricité dirigé du pôle positif au pôle négatif dans l'arc interpolaire, et du pôle négatif au pôle positif dans la pile elle-même.

Formes diverses de la pile thermo-électrique. — Les appareils thermo-électriques ont surtout été employés comme thermoscopes, cependant M. Pouillet et M. J. Regnauld s'en sont servis aussi comme moyens d'étudier les lois générales des courants électriques. Nous croyons

devoir exposer en peu de mots les diverses dispositions adoptées pour la construction des piles thermo-électriques.

Pile thermo-électrique de Nobili (1). — Cet appareil est, à proprement parler, une chaîne composée de barreaux de bismuth et d'antimoine soudés par leurs extrémités. La figure 242 représente une chaîne semblable dans

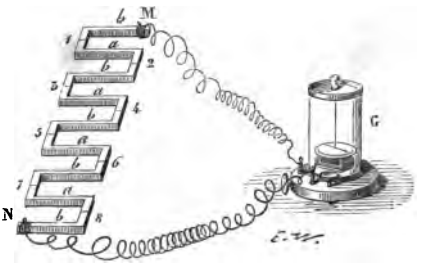


Fig. 242.

laquelle toutes les soudures de rang impair sont tournées d'un côté, et toutes les soudures de rang pair du côté opposé. Il est évident que, si toutes les soudures de rang *impair* sont chauffées pendant que toutes les soudures de rang *pair* sont maintenues à la température ambiante, il se développe un courant thermo-électrique qui traverse la pile de M en N et le fil du galvanomètre G de N en M. Le courant serait de sens inverse si les soudures de rang *pair* étaient chauffées et celles de rang *impair* maintenues à la température ambiante.

Pour plus de commodité dans l'observation, on forme

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1830, t. XLIV, p. 225.

avec les barreaux un faisceau prismatique, en les disposant parallèlement dans des rangées superposées, de manière que l'ensemble représente une chaîne métallique semblable à la précédente, et repliée plusieurs fois sur elle-même (Fig. 243). Les extrémités C, D contiennent l'une toutes les soudures de rang pair, et l'autre toutes les soudures de rang impair; on les appelle les faces de la pile. D'ailleurs, chaque rangée de barreaux est séparée de celle qui la précède et de celle qui la suit par une lame de papier verni, et, dans chaque rangée, tous les barreaux sont également isolés les uns des autres.

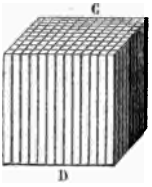


Fig. 243.

Enfin la pile, ainsi disposée en faisceau prismatique, est mastiquée dans un anneau de cuivre, de manière que ses faces C, D, enduites d'une couche de noir de fumée, débordent un peu. A la partie supérieure de l'anneau sont deux petites colonnes métalliques isolées P, P′ (Fig. 244) qui communiquent avec les extrémités de la chaîne des barreaux bismuth et antimoine, et servent à mettre la pile en rapport avec le fil d'un galvanomètre. Pour protéger les faces de l'appareil contre tout rayonnement calorifique latéral, on se sert de deux tubes prismatiques

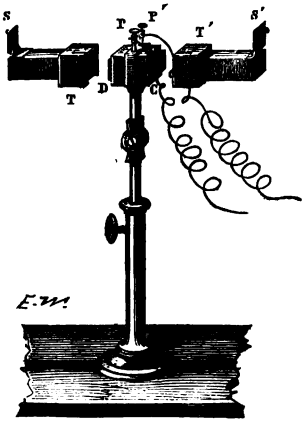


Fig. 244.

de cuivre T, T′, de 4 à 5 centimètres de longueur, noircis sur leurs faces intérieures, et qui s'ajustent exactement sur les deux extrémités de la pile. Chacun de ces tubes, d'ailleurs, est muni d'un opercule mobile S, S′, qui tantôt obture complétement, tantôt laisse ouverte son extrémité libre.

Cet appareil, très commode pour l'étude des lois de la chaleur rayonnante, a été employé par Nobili, Melloni, et MM. De la Provostaye et Desains dans leurs importantes recherches.

Pince thermo-électrique de Peltier (1). — La pince thermo-électrique (Fig. 245) imaginée par Peltier, a été

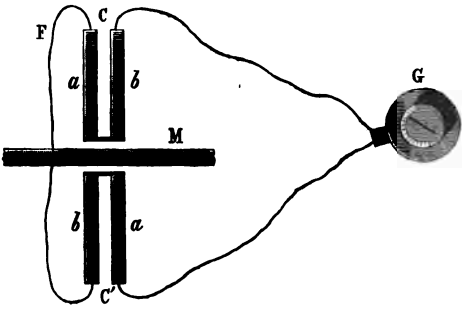


Fig. 245.

employée par lui pour étudier les phénomènes thermiques développés dans les circuits métalliques par le passage des courants électriques. C et C′ sont deux couples bismuth et antimoine. Un fil de cuivre F soudé au bar-

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1834, t. LVI, p. 371.

reau d'antimoine du couple C et au barreau de bismuth du couple C′ sert à réunir ces deux éléments thermo-électriques. Le circuit est fermé avec le fil d'un galvanomètre G. Pour comparer la température d'un fil ou d'un barreau métallique M à celle du milieu ambiant, on le dispose de manière qu'il soit saisi entre les deux couples C et C′. Quand la température du barreau M s'élève, les soudures de la pince s'échauffent, et le galvanomètre est traversé par un courant thermo-électrique dirigé du couple C′ au couple C; quand la température du barreau M s'abaisse, les soudures se refroidissent, et le courant thermo-électrique traverse le galvanomètre du couple C au couple C′. On peut ainsi déterminer le sens et la valeur de la différence qui existe entre la température du milieu ambiant et celle de la portion du barreau M comprise entre les deux couples.

Aiguilles thermo-électriques de M. Becquerel (1). — Dans ses recherches sur la température des êtres vivants, M. Becquerel a employé un appareil thermo-électrique très sensible. Cette petite pile (Fig. 246) est formée par la

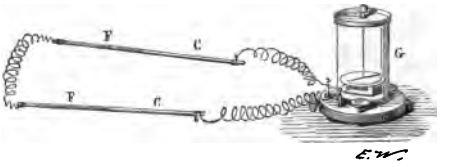


Fig. 246.

réunion de deux aiguilles composées, elles-mêmes, de deux fils de fer et de cuivre soudés ensemble. Les extrémités fer des deux aiguilles sont réunies par un fil de

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1835, t. LIX, p. 113.

fer, et les extrémités cuivre sont en communication avec le fil d'un galvanomètre. Lorsque la température de la soudure de l'une des deux aiguilles est maintenue *constante*, le sens du courant qui traverse le galvanomètre indique le sens de la variation de température éprouvée par l'autre soudure; lorsque les deux soudures sont placées dans deux parties différentes du corps d'un même animal, le sens du courant indique de quel côté est la température la plus élevée.

Aiguilles thermo-électriques de M. Dutrochet (1). — M. Dutrochet a modifié la disposition de l'appareil thermo-électrique de M. Becquerel. Aux extrémités d'un fil de fer F (Fig. 247) recourbé sur lui-même, il a soudé *latérale-*

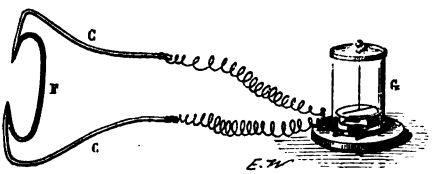


Fig. 247.

ment deux fils de cuivre C, C en rapport, par leurs extrémités libres, avec un galvanomètre. Les soudures de cette espèce de pince sont placées aux pointes du fil de fer, et le sens du courant dirigé à travers le galvanomètre indique de quel côté est l'excès de température.

Tous ces appareils sont de véritables thermoscopes; ils indiquent directement qu'un excès de température existe

(1) *Annales des sciences naturelles*, 2e série, BOTANIQUE, 1840, t. XIII, p. 5.

entre les diverses soudures dont se compose la chaîne thermo-électrique. Ils peuvent aussi servir à mesurer exactement, en degrés centigrades, la valeur de cet excès de température, lorsque, à l'aide d'une étude préalable de la marche de l'instrument, on a construit une table de réduction qui permet de transformer, en degrés du thermomètre à mercure, les indications fournies par les déviations de l'aiguille aimantée. Ce n'est pas ici le lieu d'entrer dans le détail des opérations nécessaires pour la construction de cette table de réduction.

Fig. 248.

Pyromètre magnétique de M. Pouillet (1). — M. Pouillet a utilisé les courants thermo-électriques pour la mesure des hautes températures. Son appareil (Fig. 248) se compose d'un canon de fusil de fer *ab*, et de deux fils de platine *d*, *d'*. Le fil *d* soudé à la culasse C est maintenu par un corps isolant placé à l'ouverture du canon du fusil, et vient se fixer à une pièce *x* de cuivre rouge; le fil *d'* est soudé, en *j*, au bord de l'ouverture du canon de fusil, et vient se fixer à la pièce de cuivre rouge *y*. Ces deux pièces de cuivre *x*, *y* sont en communication avec une *boussole des sinus* (2). F est une pièce

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1836, t. III, p. 782.

(2) Nous indiquerons, dans le quatrième chapitre, le principe sur lequel repose ce galvanomètre inventé par M. Pouillet.

de bois fixée sur le bout du tube de fer, et destinée à porter les deux pièces de cuivre rouge x, y.

Quand la soudure C est exposée à une haute température, il se développe dans l'appareil un courant thermo-électrique dirigé, dans le circuit de la boussole, de la pièce y à la pièce x. Une table de réduction sert à transformer les indications de la boussole en degrés centigrades, et l'on détermine ainsi l'excès de température de la soudure C sur la soudure j.

Couple et pile thermo-électriques de M. Pouillet. — Dans ses recherches sur les lois générales des courants, M. Pouillet a souvent employé, comme source constante d'électricité dynamique, le couple thermo-électrique re-

Fig. 249.

présenté figure 249. B est un cylindre de bismuth de 2 centimètres de diamètre; la longueur de la partie horizontale est de 15 centimètres, et celle des appendices verticaux de 5 centimètres. A chacun de ses bouts, est soudé un fil de cuivre C de 1 millimètre de diamètre et de 1 mètre de longueur. Dans les expériences de M. Pouillet, la température de l'une des soudures était maintenue à *zéro*, et celle de l'autre à 100 degrés. D'ailleurs, le courant est toujours dirigé du bismuth au cuivre à travers la soudure chaude.

Pour former une pile thermo-électrique (Fig. 250), M. Pouillet associait plusieurs couples semblables au précédent. Les appendices verticaux étaient plongés dans des

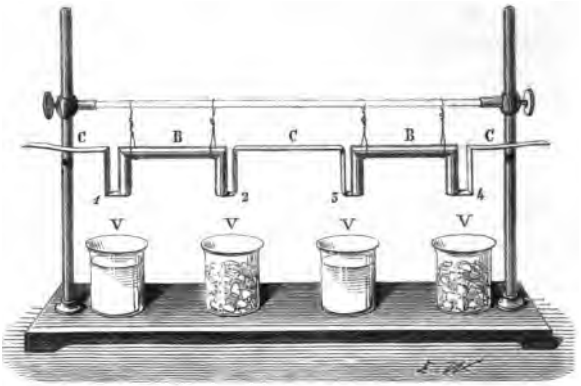


Fig. 250.

vases de verre V, V, V, V. Ces vases étaient alternativement remplis de glace fondante et d'eau chaude qui permettaient de maintenir les soudures froides à *zéro*, et les soudures chaudes à 60 ou 80 degrés.

Couple thermo-électrique de M. J. Regnauld (1). — Dans ses recherches sur les forces électromotrices, M. J. Regnauld a employé le couple thermo-électrique représenté figure 251. B est un barreau de bismuth de 3 à 4 millimètres de diamètre et de 175 millimètres de longueur ; C, C sont des fils de cuivre bien recuits de 1 millimètre de diamètre et de 105 millimètres de lon-

(1) *Ann. de chim. et de phy.*, 3e série, 1855, t. XLIV, p. 453.

gueur. On prépare les barreaux de bismuth en introduisant par aspiration le métal fondu dans des tubes de verre. La présence de cette enveloppe de verre permet de tenir les couples bien isolés, et prévient les inconvénients résultant de la fragilité du bismuth. Pour avoir des soudures bien homogènes et éviter l'emploi d'un métal

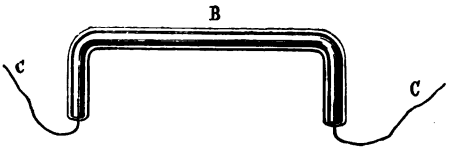


Fig. 251.

intermédiaire dans ces soudures, M. J. Regnauld chauffe à la lampe l'extrémité du tube de verre jusqu'à ce que le bismuth soit en fusion dans une longueur de 2 centimètres environ. Alors, il plonge rapidement, dans ce métal, le bout du fil de cuivre bien décapé et légèrement chauffé, et maintient les deux métaux dans un rapport convenable de position jusqu'à ce que le bismuth soit solidifié. Pour mettre le couple en activité, on place l'une des soudures dans un bain de *glace fondante*, et l'autre dans un bain d'*eau bouillante*.

Nous décrirons plus tard les dispositions adoptées par M. J. Regnauld dans l'accouplement en série de ces éléments thermo-électriques; nous exposerons en même temps les précautions qu'il a prises pour maintenir les couples bien isolés les uns des autres, et avoir des piles qui fournissent des courants d'intensité constante.

CHAPITRE III.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ.

Après avoir étudié les combinaisons chimiques comme source de force électromotrice, nous devons fixer notre attention sur les nombreuses réactions chimiques qui accompagnent le passage de l'électricité à travers les corps. Dans cette étude des propriétés chimiques de l'électricité, nous nous occuperons successivement des *courants voltaïques* et des *décharges* fournies par les appareils d'électricité statique; nous aborderons ensuite l'exposition des lois générales des décompositions électrochimiques. Les notions puisées dans l'examen de ces diverses questions nous permettront, à la fin de ce chapitre, d'analyser les circonstances au milieu desquelles la force électromotrice prend naissance dans le couple voltaïque, et de donner la théorie de la construction des électromoteurs à force constante.

ARTICLE PREMIER.

ACTION CHIMIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ VOLTAIQUE.

M. Faraday a introduit dans la science des expressions nouvelles, généralement adoptées par les physiciens, et

dont il est nécessaire de bien fixer la signification. Dans cette nomenclature, le mot *électrode* sert à désigner la surface quelconque à travers laquelle l'électricité *pénètre* dans un corps, ou en *sort*. L'*électrode* est dite *positive* ou *négative*, suivant qu'elle sert à faire entrer le courant dans le corps, ou l'en faire sortir ; en d'autres termes, suivant qu'elle communique avec le *pôle positif* ou avec le *pôle négatif* de la pile. On donne le nom d'*électrolyte* à toute substance, comme l'eau par exemple, susceptible d'être *directement* décomposée par le courant, et dont les éléments sont complétement séparés et mis en liberté. On appelle *électrolyse* ou *électrolysation* la décomposition électro-chimique d'un corps ; le corps ainsi décomposé par le passage de l'électricité dynamique est dit *électrolysé*. L'adjectif *électrolytique* sert à désigner tout phénomène de décomposition déterminé *directement* par le passage d'un courant à travers un corps. Soient, par exemple (Fig. 252) :

V une cuve de verre contenant de l'eau acidulée, C et D deux fils métalliques en communication avec les pôles de la pile et maintenus par des supports de bois, A et B deux plaques de platine fixées aux fils C, D et plongées dans l'eau. Le courant, dans le liquide, marche de A en B ; dès lors :

A est l'*électrode positive ;*

B est l'*électrode négative.*

L'eau contenue dans la cuve M est l'*électrolyte ;* elle est dite *électrolysée* tant qu'elle demeure soumise à l'action du courant.

Indépendamment des substances *directement décompo-*

sées par le courant électrique, d'autres ne le sont qu'*indirectement* et par le fait d'*actions secondaires* qui se développent pendant le passage de l'électricité dynamique.

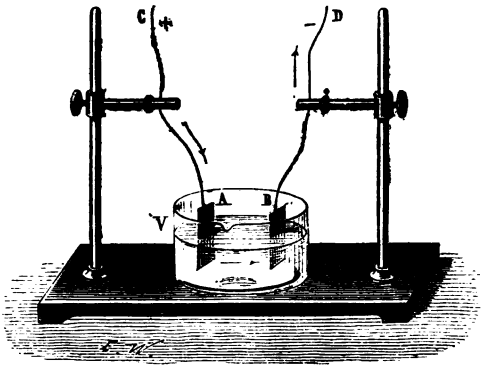


Fig. 252.

Dans la nomenclature de M. Faraday, ces derniers corps prennent le nom d'*électrolycâles*. L'eau, l'acide chlorhydrique, l'iodure de potassium, le sulfate de cuivre, corps *directement* décomposables par l'électricité, sont des *électrolytes*, tandis que l'acide sulfurique, l'acide azotique, etc., qui ne sont décomposés qu'*indirectement* et par suite d'*actions secondaires*, sont des *électrolycales*.

Décomposition de l'eau. — A travers le fond d'un verre à pied V (Fig. 253), faisons passer deux fils de platine, dont les extrémités A, B, s'élèvent à une certaine hauteur et dont les autres bouts communiquent, en P, P', avec les pôles d'une pile. On verse, dans le verre, de l'eau légèrement acidulée avec de l'acide sulfurique, et l'on coiffe les extrémités libres A, B, des fils de platine avec des tubes

gradués C, D, remplis du même liquide. Évidemment le courant traverse le liquide de A en B : A représente donc l'*électrode positive* et B l'*électrode négative*. Cet appareil, sur lequel nous reviendrons plus tard, est connu sous le nom de *voltamètre*.

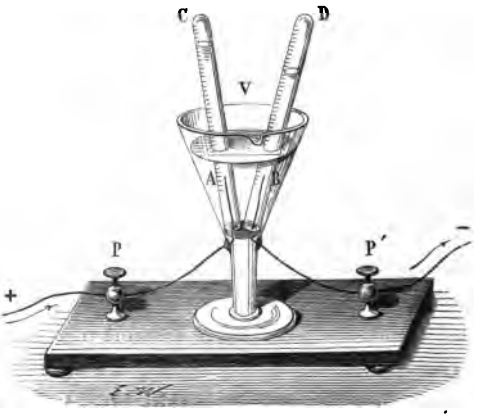


Fig. 253.

Au moment où le circuit est fermé, la décomposition de l'eau commence, et continue tant que le courant passe à travers le liquide. Les gaz provenant de la décomposition de l'eau se dégagent *en totalité* autour des électrodes A, B, et s'accumulent dans les deux tubes gradués ; à la fin de l'expérience, on trouve en C *un* volume de gaz oxygène *pur*, et en D *deux* volumes d'hydrogène *pur*. D'une part, le dégagement des gaz ne s'opère que dans les lieux où le courant change de milieu, aux surfaces de contact de l'électrolyte et des deux électrodes ; d'autre

part, les éléments de l'eau sont complétement séparés, l'oxygène se montre *tout entier* autour de l'électrode positive, et l'hydrogène autour de l'électrode négative. La décomposition électro-chimique de l'eau, observée en 1800 par Carlisle et Nickolson, est le type de l'action des courants sur les électrolytes. Toujours nous verrons les éléments du corps décomposé se partager en deux groupes, dont l'un se montre exclusivement autour de l'électrode négative, et l'autre autour de l'électrode positive.

L'eau distillée est un liquide très mauvais conducteur d'électricité dynamique; sa décomposition nécessite l'emploi d'une pile composée d'un grand nombre de couples. L'addition d'une faible quantité d'un acide, d'un alcali, ou d'un sel métallique, suffit pour rendre sa décomposition beaucoup plus facile. Dans cet état de dissolution très étendue, ces corps ne sont pas eux-mêmes décomposés par le courant; leur action se borne à augmenter considérablement la conductibilité du liquide. A l'état solide, l'eau conduit l'électricité statique, mais ne livre pas passage à l'électricité dynamique. D'après les observations de M. Faraday (1), il suffit d'une lame de *glace* excessivement mince pour arrêter *complétement* le courant fourni par une pile très puissante.

Nous avons dit plus haut que les volumes d'oxygène et d'hydrogène recueillis dans les tubes C, D, sont dans le rapport de 1 à 2. Cependant, quand on mesure avec soin les produits de la décomposition, on s'aperçoit que les gaz ne se dégagent pas exactement dans les propor-

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1834, t. LV, p 20.

tions nécessaires pour faire de l'eau ; c'est en génralé l'oxygène qui fait défaut. Cela tient à ce que, pendant la décomposition du liquide, il se produit toujours une certaine quantité d'eau oxygénée. La proportion d'oxygène ainsi retenue par le liquide est, d'ailleurs, variable et d'autant plus considérable qu'on opère à une température plus basse. Une fois l'eau oxygénée formée, le liquide peut, à son tour, réagir sur l'hydrogène mis en liberté, et absorber une partie de ce gaz.

Décomposition des corps oxygénés binaires. — L'électricité dynamique décompose les oxydes métalliques. C'est en les soumettant à l'action du courant fourni par une très forte pile que Davy est parvenu, au commencement de ce siècle, à faire rentrer les *terres* dans la classe des oxydes métalliques. Supposons qu'il s'agisse de décomposer la potasse.

Sur une lame de platine AB (Fig. 254), on place un fragment M de potasse *légèrement humectée* dont la face supérieure est creusée d'une excavation remplie de mer-

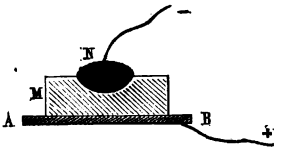


Fig. 254.

cure. La lame AB est mise en communication avec le pôle positif d'une pile, et le fil fixé au pôle négatif est plongé dans le mercure N. Le courant passe, la potasse est décomposée, son oxygène se dégage sur la lame AB

qui joue le rôle d'électrode positive, le potassium est rendu libre à la surface de contact du mercure qui représente l'électrode négative, et forme avec ce métal une combinaison qui le protége contre l'action de l'oxygène de l'air. Cet amalgame peut ensuite fournir du potassium métallique.

Tous les oxydes métalliques se conduisent comme la potasse quand on les soumet à l'action de l'électricité dynamique. Mais ces corps, quand ils sont solides et anhydres, ne livrent pas *sensiblement* passage au courant; pour obtenir des résultats appréciables, il faut préalablement les ramener à l'état liquide. A cet effet, on profite de la propriété dont jouissent quelques oxydes d'être solubles, à des degrés divers, dans l'ammoniaque liquide. Ce moyen est souvent employé pour décomposer l'oxyde de zinc, l'oxyde de cadmium, le protoxyde et le bi-oxyde de cuivre, l'oxyde d'argent, les protoxydes de nickel, de cobalt et de fer, les bi-oxydes d'étain, de mercure et de platine, le tritoxyde d'or. On peut encore, et nous reviendrons plus tard sur ce fait, agir sur les oxydes métalliques à l'état de *fusion ignée*. Quel que soit, d'ailleurs, le procédé opératoire adopté, toujours l'oxygène se dégage autour de l'électrode positive, et le métal se précipite sur l'électrode négative.

Les oxacides se comportent avec l'électricité voltaïque comme les oxydes métalliques. L'acide phosphorique vitrifié et légèrement humecté avec de l'eau est décomposé par le courant électrique; l'oxygène se dégage autour de l'électrode positive, le phosphore devient libre à la surface de l'électrode négative.

L'acide sulfurique en dissolution concentrée est aussi décomposé par le courant électrique. Le soufre se précipite sur l'électrode négative, et l'oxygène se dégage autour de l'électrode positive. Le platine de l'électrode positive peut, dans ce cas, être attaqué par l'oxygène, et se couvrir d'une couche brunâtre qui annonce la formation d'un sulfate de platine.

Dans les deux cas précédents, on peut admettre que l'acide est décomposé *directement* par le courant, et se comporte comme un véritable électrolyte. On peut admettre, au contraire, que l'action du courant porte *exclusivement* sur l'eau ; la décomposition de l'acide serait, alors, un effet *secondaire* dû à la réduction de l'acide par l'hydrogène de l'eau mis en liberté. Les résultats observés s'expliquent également bien dans l'une et l'autre hypothèse, et ne peuvent pas servir à trancher la question.

Quand on fait passer un courant à travers de l'acide azotique hydraté, l'action de l'électricité paraît s'exercer *uniquement* sur l'eau. Dans ce cas, en effet, on obtient de l'oxygène autour de l'électrode positive, et du gaz nitreux à la surface de l'électrode négative. Dans cette expérience, la décomposition de l'acide azotique n'est, très probablement, qu'un effet *secondaire*. Par l'action *directe* du courant, l'eau *seule* est décomposée ; son oxygène se dégage à la surface de l'électrode positive, et son hydrogène, rendu libre autour de l'électrode négative, réagit sur l'acide azotique, s'empare d'une partie de son oxygène, et le ramène à un moindre degré d'oxydation.

Corps binaires non oxygénés. — Les hydracides hydratés sont décomposés par l'électricité dynamique. Quand

on soumet une dissolution aqueuse d'acide chlorhydrique à l'action d'un courant, l'hydrogène se dégage pur autour de l'électrode négative, tandis que, sur l'électrode positive, on peut recueillir le chlore mélangé à quelques produits chlorés provenant de réactions secondaires. Les acides bromhydrique et iodhydrique se conduisent de même; l'hydrogène se dégage toujours autour de l'électrode négative, le brome et l'iode se montrent à la surface de l'électrode positive. Les produits de la décomposition prouvent que, dans ces divers cas, l'action du courant s'exerce *directement* sur les hydracides.

Les chlorures, les iodures, les bromures et les sulfures métalliques solubles dans l'eau peuvent aussi être décomposés par l'électricité dynamique. Quand on fait passer un courant à travers leurs dissolutions aqueuses, le métal se précipite sur l'électrode négative, tandis que le chlore, l'iode, le brome et le soufre se montrent autour de l'électrode positive. Lorsque le métal mis en liberté est susceptible de décomposer l'eau à froid, il se produit une action secondaire au sein du liquide; autour de l'électrode négative, le métal décompose l'eau, s'empare de son oxygène, et laisse dégager son hydrogène. Quant aux chlorures, iodures, bromures et sulfures métalliques insolubles dans l'eau, nous exposerons plus tard la manière dont ils se conduisent avec l'électricité dynamique quand ils ont été préalablement rendus liquides par la fusion ignée.

Dans l'action du courant électrique sur tous les corps binaires, nous rencontrons donc la même succession de phénomènes caractéristiques que dans la décomposition électro-chimique de l'eau :

1° Les éléments ne sont rendus libres qu'aux surfaces de contact des électrodes et de l'électrolyte.

2° On voit apparaître, autour de l'électrode positive, l'oxygène ou le corps qui joue le même rôle chimique que lui, et, autour de l'électrode négative, l'hydrogène ou le corps qui le représente chimiquement.

Décomposition des sels oxygénés. — Lorsque le courant électrique traverse une dissolution aqueuse d'un sel métallique, le sel est décomposé; l'acide se sépare de la base, la base elle-même est réduite, l'acide du sel et l'oxygène de la base se montrent à la surface de l'électrode positive, le métal se précipite sur l'électrode négative.

Prenons, par exemple, la dissolution aqueuse du sulfate de protoxyde de cuivre CuO. Au moment où le circuit est fermé, les éléments du sel se partagent en deux groupes : d'une part, l'acide sulfurique et l'oxygène de la base se montrent ensemble à la surface de l'électrode positive; d'autre part, le cuivre métallique se précipite sur l'électrode négative. Et, en effet, tandis que l'électrode négative se recouvre d'une couche de cuivre métallique, de l'oxygène se dégage à la surface de l'électrode positive sous forme de bulles gazeuses, et le liquide environnant, acidifié par la présence de l'acide sulfurique libre, rougit le papier de tournesol.

Effets secondaires. — Il arrive souvent que les éléments mis en liberté réagissent les uns sur les autres ou sur l'eau qui sert à dissoudre le sel; alors, à côté des produits de l'action *directe* du courant, on rencontre ceux de ces *réactions secondaires*, et les phénomènes ne se présentent pas avec la même simplicité.

Dans la partie coudée N d'un tube en U (Fig. 255), plaçons un tampon de kaolin humide, versons dans chacune de ses branches une dissolution aqueuse de sul-

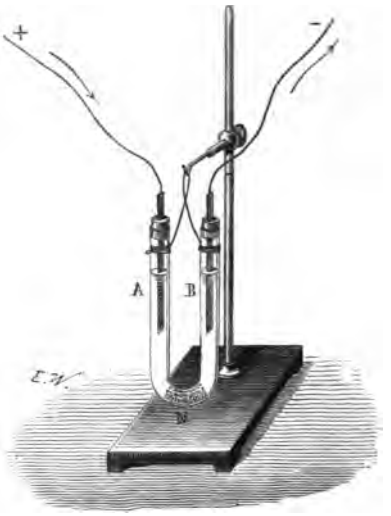


Fig. 255.

fate de potasse bleuie avec de la teinture de tournesol, et plongeons dans chaque branche une lame de platine en communication avec l'un des pôles de la pile. Le kaolin humide permet au courant de passer, mais s'oppose au mélange des liquides. Dans la branche A, autour de l'électrode positive, il y a un dégagement d'oxygène, et le liquide est *rougi* par l'acide sulfurique libre; dans la branche B, le liquide reste *bleu*, et il y a un *dégagement d'hydrogène* autour de l'électrode négative.

Les choses étant dans cet état, changeons les électrodes de place (Fig. 256), plongeons l'électrode positive dans la branche B qui contient un liquide *bleu*, et l'électrode négative dans la branche A dont le liquide a été *rougi* par

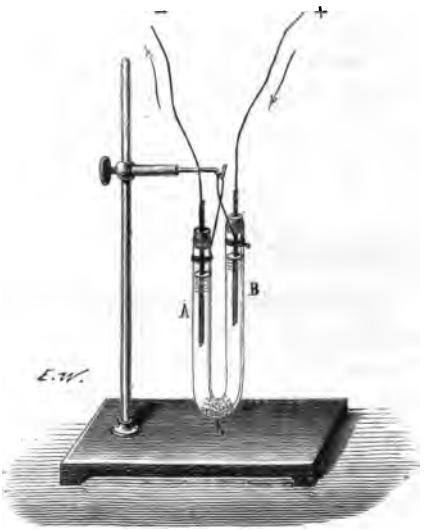


Fig. 256.

l'acide sulfurique libre. Au bout de peu d'instants, le liquide *bleu* de la branche B est *rougi* par l'acide sulfurique libre, et le liquide *rouge* de la branche A est ramené au *bleu* par la potasse; en même temps, il y a un dégagement d'oxygène autour de l'électrode positive, et un dégagement d'hydrogène autour de l'électrode négative.

Lorsqu'un courant électrique traverse une dissolution

aqueuse de sulfate de potasse, il y a donc apparition d'acide sulfurique libre et d'oxygène autour de l'électrode positive, et, en même temps, apparition de potasse libre et d'hydrogène à la surface de l'électrode négative. Ces résultats accusent évidemment le concours de deux actions, l'une *directe* et l'autre *secondaire*. Sous l'influence du courant, l'acide sulfurique se sépare de la base, la base est réduite, l'acide du sel et l'oxygène de la base se montrent à la surface de l'électrode positive, et le métal est mis à nu du côté de l'électrode négative : voilà l'*action directe*. Mais le potassium, ne pouvant pas exister à l'état métallique en présence de l'eau, réagit sur ce liquide, et s'empare de son oxygène ; la régénération de la potasse et le dégagement d'hydrogène observés à la surface de l'électrode négative sont donc le résultat d'une décomposition *secondaire* de l'eau, indépendante de l'action du courant, et qui ne reconnaît d'autre cause que les propriétés particulières du potassium. Des phénomènes du même genre se présentent toutes les fois qu'on fait passer un courant électrique à travers une dissolution aqueuse d'un sel quelconque de potasse ou de soude.

Faisons passer (Fig. 257) un courant électrique à travers une dissolution aqueuse d'acétate de protoxyde de plomb PbO. L'électrode négative B se recouvre de beaux cristaux de plomb métallique ; en même temps, l'acide acétique se montre à l'état de liberté et il se dégage de l'oxygène autour de l'électrode positive A. Mais, en outre, une pellicule noirâtre d'acide plombique PbO^2 se dépose sur cette électrode positive. Ici, encore, l'action *directe* du courant s'accompagne d'une action *secondaire*. Une

partie seulement de l'oxygène provenant de la réduction du protoxyde de plomb PbO se dégage à la surface de l'électrode positive; le reste de cet oxygène se combine

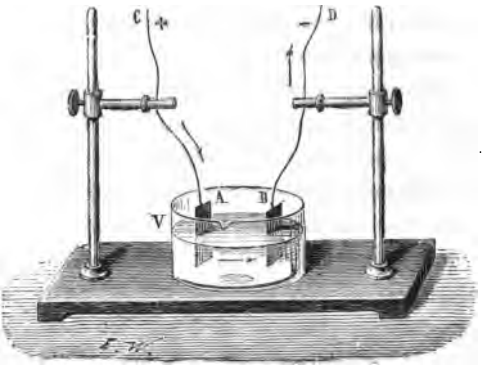


Fig. 257.

avec du protoxyde de plomb séparé de son acide, et, de cette action *secondaire*, résulte la formation de l'acide plombique PbO^2 qui vient se précipiter, en couche mince, sur l'électrode positive A.

Avec la dissolution aqueuse d'azotate de protoxyde d'argent AgO, les résultats sont les mêmes. Sur l'électrode négative il y a un précipité d'argent métallique, l'acide azotique et l'oxygène se montrent autour de l'électrode positive dont la surface se recouvre, en même temps, d'une couche de bi-oxyde d'argent AgO^2 résultat d'une action *secondaire*.

En général, lorsque le courant traverse une dissolution aqueuse d'un sel dont le métal est susceptible de

plusieurs degrés d'oxydation, il se développe dans le liquide des actions *secondaires* du genre de celles que nous avons décrites à propos du plomb et de l'argent. Les produits qui, dans ces cas, se déposent sur les électrodes peuvent altérer leur conductibilité et faire varier l'intensité des courants transmis.

C'est ici le lieu de signaler un phénomène qui se montre souvent dans les actions électro-chimiques. Les gaz fournis par la décomposition de l'électrolyte sont, en partie, retenus et condensés par les électrodes de platine, et forment à la surface de ces lames métalliques des couches gazeuses minces que l'électricité traverse difficilement. A cause de la résistance qu'elles opposent au passage du courant, ces accumulations gazeuses sont une des causes les plus fréquentes de l'affaiblissement de la force de la pile.

Jusqu'ici nous avons supposé qu'on se servait de lames de platine pour transmettre l'électricité à l'électrolyte; mais on peut employer comme électrodes des métaux susceptibles d'être, eux-mêmes, attaqués par les produits de la décomposition. Alors, prennent naissance des actions secondaires nouvelles dont la nature varie avec celle du métal et celle de l'électrolyte.

Employons une plaque de *zinc* comme *électrode positive* dans la décomposition électrolytique de l'eau chargée d'une faible proportion d'acide sulfurique. L'oxygène mis en liberté à la surface de l'électrode de zinc attaque ce métal, et l'oxyde provenant de cette action est dissous par l'acide sulfurique. Dans ce cas, il n'y a pas de dégagement d'oxygène, la liqueur se charge de plus en plus de sulfate de zinc, et, comme d'ailleurs la surface de l'électrode

positive de zinc reste toujours parfaitement *nette*, le passage du courant n'est pas gêné. Dans cette opération, le poids de l'électrode de zinc diminue tant que dure le passage du courant. — Il arrive un moment où l'eau et le sulfate de zinc dissous sont tous les deux décomposés; alors, de l'oxygène et de l'acide sulfurique sont mis en liberté autour de l'*électrode positive* et se combinent avec le zinc; en même temps, on observe un dégagement d'hydrogène autour de l'électrode négative et un dépôt de zinc métallique sur sa surface. — Mais la proportion de sulfate de zinc augmente dans le liquide et devient bientôt assez considérable pour que le sel soit *seul* décomposé par le courant; alors, la quantité de zinc déposée sur l'électrode négative est égale à celle que l'acide dissout à la surface de l'électrode positive, la composition de la dissolution reste constante, et tout se passe comme si le zinc, à l'état métallique, était transporté de l'électrode positive à l'électrode négative.

Employons une lame de *plomb* comme *électrode positive* dans la décomposition électrolytique d'une dissolution de sulfure de potassium. Le soufre mis à nu autour de l'électrode positive se combine d'abord avec le plomb; il se forme, ainsi, sur cette électrode positive une couche adhérente de *sulfure insoluble* dans la liqueur. Comme le sulfure de plomb est *conducteur* de l'électricité, sa présence n'empêche pas le courant de passer, et la décomposition de l'électrolyte continue. Mais, alors, le soufre se précipite en nature autour de l'électrode positive, parce qu'il ne peut plus attaquer le plomb protégé contre son action par une couche adhérente et insoluble de sulfure.

Sous l'influence de causes très diverses, des dépôts de ce genre peuvent se former à la surface des plaques métalliques; ces lames deviennent ainsi inattaquables par les acides et incapables de jouer le rôle d'élément *positif* dans une combinaison voltaïque. On dit alors que le métal est devenu *passif*. M. Schœnbein a étudié, avec beaucoup de soin, la *passivité* que prennent les *fils de fer* quand ils sont chauffés à la lampe, ou exposés à l'action de l'acide azotique dont la densité est de 1,40. M. Faraday, dans une lettre à M. Phillips (1), a très heureusement fait rentrer la *passivité* du fer dans les phénomènes précédents, en prouvant qu'elle dépend de la présence d'une couche mince d'oxyde dont sa surface est recouverte. M. Beetz a confirmé l'exactitude de cette interprétation (2); il a démontré directement l'existence de cette couche mince d'oxyde à la surface des fils de fer rendus *passifs*.

Prenons une plaque d'*étain*, et employons-la comme *électrode positive* dans la décomposition électrolytique d'une dissolution aqueuse de sulfure de potassium. Le soufre rendu libre se combine avec l'étain, et la surface de l'électrode positive se recouvre d'une couche adhérente de sulfure insoluble. Mais, comme le sulfure d'étain est un *corps isolant*, le courant est complétement arrêté, et toute décomposition de l'électrolyte cesse à l'instant.

Il peut aussi se passer des actions secondaires entre l'*électrode négative* et les produits de la décomposition. Employons, par exemple, une lame de platine recouverte

(1) *Experimental Researches*, t. II, p. 239.
(2) *Archives de l'électricité*, 1844, t. IV, p. 509.

de *peroxyde de plomb* comme *électrode négative*, et prenons l'eau pour électrolyte. Dans ce cas, l'hydrogène rendu libre réduit le *peroxyde* de plomb, et se combine avec son oxygène pour refaire de l'eau ; par conséquent, tant qu'il reste du *peroxyde* à la surface de l'*électrode négative*, il n'y a pas de dégagement d'hydrogène bien que le courant passe et que l'eau soit décomposée. Les effets seraient du même genre avec toute autre substance *capable de se combiner avec l'hydrogène ou de lui céder un de ses éléments*, et employée comme *électrode négative*.

Ces exemples, auxquels nous pourrions en ajouter bien d'autres, sont suffisants pour faire comprendre combien sont importantes et variées ces *actions secondaires* déterminées par le contact des électrodes et des produits de la décomposition des électrolytes.

En mettant de côté ces *actions secondaires* qu'il est toujours facile de reconnaître, nous pouvons résumer, dans les deux propositions suivantes, l'ensemble des phénomènes observés pendant le passage d'un courant à travers un électrolyte quelconque :

1° L'oxygène, les acides et tous les corps qui, comme le chlore, l'iode, etc., jouent le même rôle chimique, deviennent libres à la surface de l'*électrode positive ;* tandis que l'hydrogène et les métaux se montrent toujours du côté de l'*électrode négative*.

2° Dans l'*électrolyse*, l'oxygène, les acides, le chlore, l'iode, etc., prennent une *tension négative ;* l'hydrogène et les métaux prennent une *tension positive*.

Décomposition des corps mélangés. — Quand le courant passe dans une dissolution aqueuse contenant deux

sels, en général ils ne sont pas attaqués tous les deux à la fois, et la décomposition porte exclusivement sur celui qui conduit le mieux l'électricité. Ainsi, *cent* équivalents d'eau dans lesquels on a fait dissoudre *un* équivalent d'azotate d'argent et *un* équivalent d'azotate de cuivre étant soumis à l'action d'un courant fourni par une pile de cinq ou six éléments, l'argent est seul précipité sur l'électrode négative, et l'azotate de cuivre n'éprouve aucune altération. Mais qu'arriverait-il si, les quantités d'eau et d'azotate d'argent restant les mêmes, on augmentait la proportion d'azotate de cuivre? MM. Becquerel ont publié des résultats (1) qui permettent de répondre à cette question. Tant que la dissolution ne contient pas *plus* de *soixante* équivalents d'azotate de cuivre contre *un* équivalent d'azotate d'argent, ce dernier sel est seul décomposé. Mais, du moment que cette proportion est dépassée, les deux sels sont attaqués à la fois, les deux métaux se montrent en même temps sur l'électrode négative, et le rapport du poids du cuivre mis en liberté à celui de l'argent précipité augmente à mesure que la quantité d'azotate de cuivre devient plus considérable dans la dissolution. Les phénomènes déterminés par le passage d'un courant électrique à travers une dissolution qui contient plusieurs corps dépendent donc, à la fois, de la *conductibilité* et de la *masse* des électrolytes mélangés.

Influence de l'état physique des corps sur leurs propriétés électrolytiques. — A l'état solide, les corps composés sont, en général, de très mauvais con-

(1) *Traité d'électricité*, 1855, t. II, p. 41.

ducteurs d'électricité dynamique, beaucoup même, quand ils sont bien *désséchés*, arrêtent le courant fourni par des piles très puissantes. Il résulte des recherches de M. Faraday (1) qu'une plaque mince de glace (eau congelée) est un isolant parfait pour le courant d'une pile de force ordinaire, et ne se laisse traverser que par des traces à peine appréciables de l'électricité fournie par une pile de cent cinquante couples. A la température ordinaire, l'iodure de potassium *sec* se conduit comme la glace; le chlorure de sodium et le chlorure de plomb qui ont éprouvé la fusion ignée ne laissent passer aucune trace appréciable de courant, quand on les place ensuite, à l'état solide dans le circuit d'une pile de cent cinquante couples. A l'état solide, l'eau, l'iodure de potassium, les chlorures de sodium et de plomb bien *secs* sont donc indécomposables par le courant électrique.

Cependant l'eau pure, à l'état liquide, est traversée et décomposée par l'électricité dynamique. M. Faraday a démontré (2) que cette influence de la solidification et de la liquéfaction sur la conductibilité et sur les propriétés électrolytiques des corps n'est pas particulière à l'eau. A cet effet, il a successivement essayé diverses substances à l'*état solide* et à l'état de *fusion ignée*.

Nous extrayons de son mémoire une liste de substances très différentes par leur composition qui, *sèches* et *solides*, sont complétement *isolantes* ou du moins conduisent assez faiblement le courant électrique pour ne donner aucune trace appréciable de décomposition, tandis que, *ramenées*

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1834, t. LV, p. 20 et 31.
(2) *Loc. cit.*, p. 20 et suiv.

à l'état liquide par simple élévation de température, elles deviennent *conductrices*, et se comportent comme de vrais *électrolytes*. Les substances suivantes sont toutes dans ce cas :

1° L'eau.

2° *Oxydes*. La potasse, le protoxyde de plomb, l'oxysulfure d'antimoine (verre d'antimoine), le protoxyde d'antimoine, l'oxyde de bismuth.

3° *Chlorures*. Les chlorures de potassium, de sodium, de baryum, de strontium, de calcium, de magnésium, de manganèse, de zinc, de plomb, d'antimoine, d'argent, les protochlorures de cuivre et d'étain.

4° *Iodures*. Les iodures de potassium, de zinc, de plomb, le proto-iodure d'étain, le bi-iodure de mercure (1).

5° *Fluorures*. Le fluorure de potassium, et le fluorure de plomb (2).

6° *Cyanures*. Le cyanure et le sulfo-cyanure de potassium.

7° *Sulfures*. Le sulfure de potassium obtenu par la réduction du sulfate de potasse au moyen de l'hydrogène, et le sulfure ordinaire de potasse.

8° *Sels*. Le chlorate de potasse, les azotates de potasse,

(1) M. Faraday avait annoncé, dans son mémoire, que le bi-iodure de mercure à l'état de *fusion ignée* devient *conducteur*, mais reste *indécomposable* par le courant; M. Beetz a démontré (*Ann. de chim. et de phys.*, 1854, 3e série, t. XLII, p. 248) que ce corps est un électrolyte quand il est *fondu*.

(2) M. Beetz (*loc. cit.*, p. 249) a prouvé que le fluorure de plomb *fondu* est *conducteur*, et *décomposable* par le courant électrique.

de soude, de baryte, de strontiane, de plomb, de cuivre et d'argent, les sulfates de soude et de plomb, le protosulfate de mercure, les phosphates de potasse, de plomb, de cuivre, le phosphate acide de chaux, les carbonates de potasse et de soude, les borates de soude et de plomb, le perborate d'étain, le chromate et le bichromate de potasse, le chromate de plomb, l'acétate de potasse, le silicate de potasse, le caméléon minéral.

En général, lorsqu'un corps composé cesse d'être isolant au moment de sa liquéfaction, il acquiert un pouvoir conducteur très considérable. De toutes les substances comprises dans la liste précédente, la glace est celle dont la fusion modifie le moins la résistance au passage de l'électricité. Ces faits portent à penser que la liquéfaction des sels est la principale cause de la grande différence qui existe entre le pouvoir conducteur de leur dissolution aqueuse et celui de l'eau pure.

Dans les phénomènes que nous venons de décrire, tout ne doit pas être absolument rapporté au changement d'état; l'élévation de température y joue certainement un rôle important. M. Faraday s'est assuré que beaucoup de corps solides, qui jouissent de la propriété de s'amollir avant de fondre, deviennent *conducteurs* et *décomposables* dès que leur consistance commence à diminuer. Il résulte des recherches de M. Faraday (1), de M. Buff (2) et de M. Beetz (3) que le verre ordinaire et plusieurs autres espèces de verre conduisent le courant électrique, et sont

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1834, t. LV, p. 27.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1854, t. XLII, p. 125.
(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1854, t. XLII, p. 249.

décomposés par lui à une température très inférieure à celle de leur fusion. M. Hittorff a prouvé (1) que le sous-sulfure de cuivre et le sulfure d'argent, dont la conductibilité augmente avec la température, deviennent aussi électrolysables avant d'éprouver la fusion ignée.

Si beaucoup de corps composés, au moment de leur passage de l'état solide à l'état liquide, deviennent *conducteurs* et *électrolysables*, il ne faut pas croire cependant que cette condition soit suffisante pour communiquer à une substance composée quelconque la propriété d'être traversée et décomposée par le courant de la pile. M. Faraday a donné une longue liste de corps, très différents les uns des autres par leur composition, qui tous restent *isolants* à quelque température qu'on les porte. Parmi ces substances qui restent *indécomposables* à l'état de fusion ignée comme à l'état solide, nous nous contenterons de citer les suivantes :

L'iodure de soufre, le periodure et le per-chlorure d'étain, le chlorure d'arsenic, les deux sulfures d'arsenic connus sous les noms de réalgar et d'orpiment, le periodure de zinc, l'acide borique, l'acide acétique glacial, l'acide margarique, l'acide oléique, la stéarine, la caféine, le camphre artificiel.

L'expérience avait déjà démontré que l'élévation de température diminue constamment le pouvoir conducteur de tous les métaux, y compris le mercure, et augmente la conductibilité des liquides électrolysables. Les recherches de M. Faraday ont établi que beaucoup de

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1852, t. XXXIV, p. 124.

corps composés solides, *isolants* à la température ordinaire, peuvent, par une simple élévation de température, et surtout par la fusion ignée, être rendus *conducteurs* et *électrolysables*.

Rôle de l'eau dans les décompositions électro-chimiques. — En présence des faits précédents qui nous montrent des corps *anhydres* décomposés par le passage du courant électrique, il n'est plus possible de soutenir la doctrine longtemps adoptée par les physiciens. On pensait généralement, et quelques physiciens professent encore que, dans toute dissolution saline, l'effet *direct* du courant se porte *en totalité* sur l'eau qui *seule* est *électrolysée*. La décomposition du sel ne serait, dans cette hypothèse, qu'un effet *secondaire* dû à l'action de l'hydrogène mis à nu qui réduirait la base, et précipiterait le métal sur la surface de l'électrode négative. Bien que cette manière d'interpréter les faits ne puisse plus être admise comme théorie générale, cependant, dans beaucoup de circonstances, l'eau des dissolutions salines est réellement électrolysée, et la décomposition du sel est, en totalité ou en partie, un simple effet *secondaire*. M. D'Almeida a publié (1), dans ces derniers temps, des observations qui jettent un grand jour sur ce point délicat d'électro-chimie.

N (Fig. 258) est un flacon de verre dont le goulot est percé, en *o*, d'un trou de *deux* à *trois dixièmes* de millimètre de diamètre. Ce flacon est placé dans un vase cylindrique de verre P; le flacon et le vase sont remplis d'une dissolution saline de manière que le niveau

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1855, t. XXIX, p. 5.

du liquide ne s'élève, de part et d'autre, que juste à la hauteur de l'ouverture *o*. On met le flacon N en communication avec le pôle *négatif*, et le vase P avec le pôle *positif* d'une pile. Les électrodes sont des fils métalliques entourés de tubes de verre, et plongent jusqu'au fond

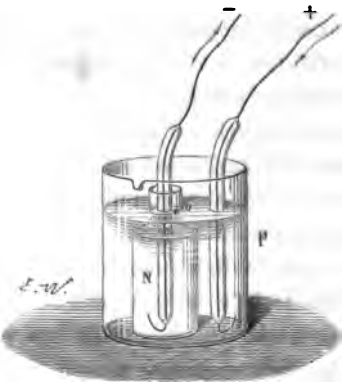


Fig. 258.

des vases. Le courant passe du vase P au flacon N à travers l'ouverture *o*; mais, à cause de l'étroitesse du canal de communication, les liquides ne peuvent pas se mêler et restent parfaitement distincts pendant toute l'opération. Cela posé, M. D'Almeida a fait les trois expériences suivantes :

1° Une même dissolution saline étant introduite dans les vases et le circuit étant fermé, il a maintenu à l'*état neutre* le liquide de P et le liquide de N pendant toute la durée de l'opération. La composition et le poids du liquide contenu dans chaque vase avant le passage du courant étaient

connus; en tenant compte de la quantité de sel formé de chaque côté pour maintenir la neutralité des liquides, et en analysant séparément les liqueurs contenues dans les deux vases après l'opération, il était facile de déterminer le poids du sel perdu, pendant le passage du courant, par le vase positif P et par le flacon négatif N. M. D'Almeida a trouvé que, dans le cas d'une dissolution *primitivement neutre* et constamment maintenue *neutre*, le liquide du vase positif P perd exactement *autant de sel* que celui du flacon négatif N. Ce résultat démontre que, dans les *dissolutions neutres*, le courant passe tout entier par le composé salin sans attaquer l'eau qui sert à le maintenir à l'état liquide. En effet, si une partie de l'électricité avait été conduite par l'eau, de l'hydrogène aurait été mis à nu à la surface de l'électrode négative. Cet hydrogène à l'état naissant aurait décomposé une proportion correspondante de sel dans le flacon N; par conséquent, la perte de sel aurait été nécessairement *plus considérable* dans le vase N que dans le vase P, ce qui est contraire aux faits observés.

2° La dissolution du vase P est rendue *acide* avant l'opération, celle du flacon N est laissée *neutre* et maintenue telle pendant que le courant passe. Dans ce cas, au moment où le courant est interrompu, le liquide du flacon N a perdu *plus de sel* que celui du vase P. Évidemment, dans le liquide *acidulé* du vase P, le courant s'est *partagé entre le composé salin et l'eau acide*, tandis que, dans le liquide *neutre* du flacon N, le sel a *seul* été électrolysé. On explique, ainsi, très naturellement comment le liquide en contact avec l'électrode positive a perdu moins de

sel que le liquide en rapport avec l'électrode négative.

3° La dissolution du vase P est laissée et maintenue *neutre*, tandis que celle du flacon N est rendue fortement *alcaline* avant l'opération. Au moment où le circuit est rompu, on trouve, contrairement à ce qui a été observé dans le cas précédent, que le liquide *alcalin* du flacon N a perdu *moins de sel* que le liquide *neutre* du vase P. Ici donc encore, dans le liquide *neutre* du vase P, le composé salin a *seul* été électrolysé; mais, dans le *liquide alcalin* du flacon N, le courant s'est partagé entre le sel et l'eau alcaline.

De ces observations, il est permis de conclure que :

1° Dans une dissolution saline *neutre*, le sel est *seul* électrolysé, et l'électrolysation du composé salin est tout entière un effet *direct* du courant.

2° Dans une dissolution saline *acide* ou *alcaline*, le *sel* et *l'eau* sont tous deux électrolysés; dans ce cas, la décomposition du sel doit être rapportée en partie à l'action *directe* du courant, et en partie à l'action *secondaire* de l'hydrogène mis à nu.

Ces faits servent à comprendre pourquoi, conformément aux observations de MM. Daniell et Pouillet, les dissolutions salines électrolysées s'appauvrissent, en général, plus rapidement du côté de l'électrode négative que du côté de l'électrode positive. En effet :

Supposons que, dans l'appareil de la figure 258, on place une dissolution *neutre* de sulfate de cuivre. Dans le premier moment, le sulfate est seul électrolysé; mais, au bout de très peu de temps, par le fait de la précipitation du cuivre sur l'électrode négative et de l'apparition de

l'acide sulfurique à la surface de l'électrode positive, le liquide du vase P devient *acide*, tandis que celui du flacon N reste *neutre*. A partir de ce moment, la perte de sel est nécessairement plus forte et la dissolution s'appauvrit plus vite dans le flacon N que dans le vase P.

Si, dans l'appareil, on plaçait une dissolution neutre d'un sel de potasse, le liquide du flacon N deviendrait *alcalin* en même temps que le liquide du vase P deviendrait *acide ;* cependant le résultat serait le même que dans le cas précédent. En effet, la conductibilité de l'eau acidulée est beaucoup plus considérable que celle de l'eau alcaline ; par conséquent, la portion du courant total conduite par le composé salin serait plus faible dans le vase P que dans le flacon N, et la dissolution s'appauvrirait plus vite du côté de l'électrode négative que du côté de l'électrode positive.

Quand le passage du courant donne lieu à un dégagement considérable de gaz, il est difficile de maintenir exactement le niveau des liquides, et ce système de deux vases de verre emboîtés (Fig. 258) ne fournit plus de bons résultats. Dans ce cas, M. D'Almeida donne à son appareil la disposition suivante (Fig. 259). N et P sont deux tubes de verre fermés, à leur partie inférieure, par une membrane organique, et assez grands pour contenir chacun 25 centimètres cubes de la dissolution saline à essayer. Ces tubes sont plongés dans un vase de verre, et maintenus en place au moyen d'un bouchon BB. Après avoir versé la dissolution dans les tubes et dans le fond du vase, on place l'électrode *négative* dans le tube N, et la *positive* dans le tube P ; le courant passe, alors, de P en N à travers

le liquide du vase dans lequel plongent les deux tubes.

Polarisation des électrodes. — M. De la Rive a, le premier, observé (1) que les lames et les fils de platine employés comme électrodes dans les décompositions

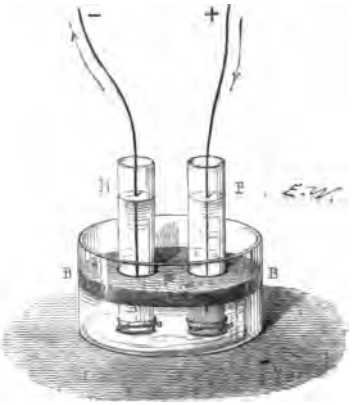


Fig. 259.

électro-chimiques acquièrent des propriétés particulières. Lorsque l'appareil a marché quelque temps, on retire les électrodes de la dissolution saline, et on les plonge dans de l'*eau pure* après les avoir détachées de la pile et les avoir mises en communication avec le fil d'un galvanomètre. L'aiguille aimantée est chassée de sa position d'équilibre, et sa déviation montre que l'eau est traversée par un courant dirigé de l'électrode négative à l'électrode positive, c'est-à-dire de sens opposé à celui du courant que ces électrodes ont primitivement servi à trans-

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 1825, t. XXVIII, p. 218.

mettre. Ce courant, connu sous le nom de courant *secondaire*, s'affaiblit graduellement et disparaît au bout de très peu de temps. Les électrodes qui ont acquis la propriété de donner naissance à ce courant *secondaire* sont dites *polarisées*. En tenant compte de ce que nous avons dit précédemment de la distribution des éléments d'un électrolyte soumis à l'influence d'un courant, ces phénomènes de polarisation sont faciles à expliquer.

En effet, nous avons vu que, dans la décomposition électro-chimique d'un sel métallique quelconque, les acides, le chlore, l'iode, le brôme sont mis en liberté à la surface de l'électrode positive, tandis que les métaux se précipitent sur l'électrode négative. Lorsque ces électrodes, ainsi recouvertes des produits de la décomposition, sont plongées dans l'eau, les corps accumulés à leur surface réagissent les uns sur les autres par l'intermédiaire de l'eau, et de leur combinaison résulte ce courant *secondaire* qui est toujours dirigé, dans le liquide, du métal à l'acide, ou au chlore, ou à l'iode, ou au brôme, c'est-à-dire de l'électrode négative à l'électrode positive. Ce courant, d'ailleurs, est nécessairement *temporaire;* il ne peut durer, et ne dure en effet, que jusqu'à l'entier épuisement des produits de la décomposition accumulés sur les électrodes.

Pour démontrer la justesse de cette explication, il suffit de plonger, l'une dans un acide, l'autre dans une solution alcaline, deux lames de platine fixées au fil d'un galvanomètre; l'expérience montre que ces lames, parfaitement inactives avant cette opération, donnent, au moment où on les met dans l'eau, un courant *temporaire* dirigé, dans

le liquide, de la base à l'acide. M. Matteucci (1) a fait sur ce sujet une expérience très intéressante. Deux lames de platine fixées au fil d'un galvanomètre et plongées dans l'eau pure ne donnent aucun courant; mais, si l'une de ces lames a été maintenue quelques instants dans un flacon d'oxygène et l'autre dans un flacon d'hydrogène, il suffit de les immerger dans l'eau pour que les gaz condensés à leur surface réagissent l'un sur l'autre, et qu'il se produise un courant dirigé, dans le liquide, de la lame qui a séjourné dans l'hydrogène à celle qui est restée en contact avec l'oxygène. Ce fait rend parfaitement compte de la *polarisation* des électrodes de platine qui ont servi à décomposer l'eau. L'électrode positive, en effet, condense toujours à sa surface une couche mince d'oxygène, tandis que la négative se recouvre d'une couche semblable d'hydrogène.

Piles secondaires. — Le jeu des *piles secondaires* découvertes par Ritter (2), et que ce physicien considérait comme des condensateurs d'électricité dynamique, s'explique très bien par les phénomènes de la *polarisation* des électrodes.

Dans une cuve rectangulaire de bois, plaçons (Fig. 260) des lames de platine P, P′, P″, P‴, et versons, dans les cellules vides, une dissolution de sulfate de potasse ou de tout autre sel métallique; cet appareil est d'abord *inactif*, et ne donne, par lui-même, aucune trace de courant. A l'aide des électrodes E, E′, faisons communiquer une de ses ex-

(1) *Lezioni di fisica*, 2e édit. Pisa, 1844, p. 288.
(2) *Journal de physique*, 1803, t. LVII, p. 345.

trémités avec le pôle positif, et l'autre avec le pôle négatif d'une pile ; l'ensemble des plaques métalliques et des cellules pleines de liquide est traversé par un courant *direct* dirigé de P en P'''. Au bout d'un certain temps, suppri-

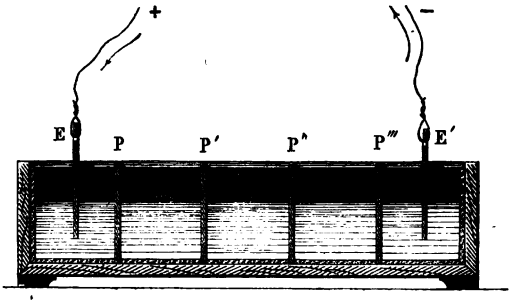


Fig. 260.

mons l'action de la pile ; l'expérience démontre que l'appareil est devenu *actif*. Si, en effet, on met ses extrémités en communication avec le fil d'un galvanomètre, le circuit est traversé par un courant dirigé de P''' en P, et dont, par conséquent, le sens est *contraire* à celui du courant *direct*. Ce courant *secondaire* est d'ailleurs *temporaire*, il s'affaiblit graduellement et ne tarde pas à s'éteindre complétement. Pendant tout le temps que le courant *direct* passe, le liquide dont chaque cellule est remplie doit être considéré comme un *électrolyte* distinct ; dès lors, de P en P''', chaque plaque métallique joue le rôle d'électrode négative par rapport à la cellule qui la précède, et d'électrode positive par rapport à celle qui la suit. Il en résulte que, dans le cas de la solution de sulfate de po-

tasse, chaque plaque de platine, au moment où le courant de la pile est interrompu, est recouverte d'une couche d'acide sulfurique sur la face par laquelle elle a transmis le courant, et d'une couche de potasse sur la face par laquelle elle l'a reçu. L'acide et l'alcali libres, accumulés sur les surfaces métalliques qui se regardent, réagissent l'un sur l'autre à travers le liquide des cellules, et leur combinaison produit le courant *secondaire* observé dans l'appareil de Ritter quand, après l'interruption du courant de la pile, ses extrémités sont mises en communication.

Dans la pile voltaïque en action, le liquide qui sépare les métaux des couples est décomposé, et ses éléments s'accumulent sur les surfaces métalliques. Ces éléments, séparés par une couche liquide, tendent à se combiner comme dans les piles *secondaires* de Ritter; leur réaction réciproque produit un courant *secondaire* de sens contraire à celui du courant de la pile. Ces courants *secondaires*, dus à la *polarisation* des électrodes et des lames métalliques des couples voltaïques, tendent à affaiblir l'intensité du courant direct de la pile; ils donnent naissance à des actions perturbatrices dont il faut tenir grand compte dans l'étude des lois des courants électriques.

ARTICLE II.

ACTION CHIMIQUE DES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES.

Le passage de l'étincelle électrique à travers les substances gazeuses produit des effets extrêmement variés :

tantôt des combinaisons gazeuses très stables sont détruites et leurs éléments sont mis en liberté; tantôt des gaz simples se combinent entre eux ou avec des gaz composés. Ainsi, par une série d'étincelles, on décompose :

L'acide carbonique en....	oxyde de carbone et oxygène.
Le gaz chlorhydrique en ..	hydrogène et chlore.
L'hydrogène sulfuré en...	hydrogène et soufre.
Le gaz ammoniac en	hydrogène et azote.
L'hydrogène carboné en...	hydrogène et carbone.

Tandis que, sous l'influence d'une série d'étincelles, les mélanges gazeux suivants donnent :

L'oxygène et l'hydrogène.....	de l'eau.
Le chlore et l'hydrogène.....	de l'acide chlorhydrique.
L'oxyde de carbone et l'oxygène...	de l'acide carbonique.
L'acide sulfureux et l'oxygène....	de l'acide sulfurique.

Dans certains mélanges gazeux, les éléments mis en liberté se combinent et produisent des combinaisons secondaires qui dépendent, d'ailleurs, des proportions des gaz mélangés. Ainsi :

Dans un mélange d'air et de vapeur d'eau, l'eau est décomposée, et il se forme de l'azotate d'ammoniaque.

Dans un mélange d'hydrogène carboné et d'oxygène, l'hydrogène carboné est décomposé, et il se forme de l'eau et de l'acide carbonique.

Dans un mélange d'hydrogène sulfuré et d'oxygène, l'hydrogène sulfuré est décomposé, et il se forme de l'eau et de l'acide sulfurique.

Ces exemples suffisent pour montrer combien sont nombreuses et diverses les réactions chimiques produites par le passage de l'étincelle électrique à travers les mé-

langes gazeux. La variété même de ces effets était une raison de penser qu'ils devaient être attribués moins à l'action propre de l'électricité qu'à l'influence de la chaleur dont l'étincelle s'accompagne toujours. Cette manière de voir se trouve complétement justifiée par les résultats d'un travail dans lequel M. Grove (1) a obtenu des effets de même nature que les précédents, en soumettant divers mélanges gazeux à l'action d'un fil de platine maintenu incandescent.

Les décharges électriques ont aussi la propriété de décomposer les liquides. Dès l'année 1790, en faisant éclater l'étincelle fournie par la décharge d'une bouteille de Leyde entre les deux extrémités de deux fils métalliques plongés dans de l'eau contenue dans un tube de verre, Paetz et Van Troostwik (2) avaient décomposé l'eau, et mis ses deux éléments oxygène et hydrogène en liberté. Cuthberson et Pearson (3) réussirent aussi à décomposer l'eau, en la faisant traverser par une série d'étincelles. Plus tard Wollaston (4) décomposa l'eau avec les étincelles fournies par une machine électrique de force médiocre. Mais, dans toutes ces expériences, l'hydrogène et l'oxygène étaient rendus libres *sans être séparés;* ils se dégageaient ensemble dans tous les points du liquide traversé par l'étincelle.

Cependant Wollaston était parvenu à décomposer des

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1847, t. XIX, p. 253.
(2) *Ann. de chim.*, 1798, t. XXVII, p. 161.
(3) *Ann de chim.*, 1798, t. XXVII, p. 165.
(4) *Ann. de chim.*, 1801, t. XL, p. 169.

sels métalliques par le même procédé. Dans une solution de sulfate de cuivre, il remarqua que le bout du fil négatif se couvrait, *seul*, d'un dépôt de cuivre réduit ; dans de la teinture de tournesol fortement colorée, la portion du liquide en contact avec le bout du fil positif prit, *seule*, une teinte rouge prononcée.

M. Bonijol (1), de son côté, avait montré que l'électricité atmosphérique décompose l'eau aussi bien que l'électricité des machines à plateau. Enfin, avec une série d'étincelles fournies par une machine électrique ordinaire, il avait décomposé le chlorure d'argent et la potasse, et avait obtenu les deux métaux à l'état de pureté.

Mais ce sont surtout les travaux de M. Faraday (2) qui ont bien fait connaître le mode d'action des décharges

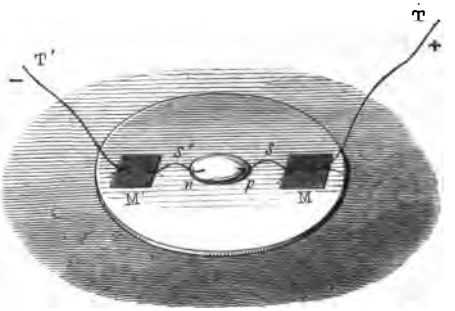


Fig. 261.

d'électricité statique sur les électrolytes. Sur une plaque de verre (Fig. 261), il applique deux feuilles d'étain M, M' ;

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1830, t. XLV, p. 213.
(2) *Experimental Researches*, t. I, p. 127.

la feuille M est mise en communication avec le conducteur *positif* d'une machine au moyen du fil métallique T, la feuille M′ communique avec le conducteur *négatif* de la machine ou tout simplement avec le sol au moyen du fil métallique T′. Sur le milieu de la plaque de verre, il dépose une goutte d'une dissolution de sulfate de cuivre *pn*; des fils fins de platine *s*, *s′* font communiquer les plaques d'étain M, M′ avec les extrémités de cette goutte liquide. Lorsque la machine est en action, un flux d'électricité positive traverse le système de T en T′ sans qu'il y ait production d'étincelle. *p* est le pôle positif et *n* le pôle négatif du courant qui traverse la dissolution; au bout de très peu de temps, le sulfate de cuivre est décomposé, ses éléments sont *séparés*, et le cuivre métallique se précipite sur le bout du fil de platine *s′* au pôle *négatif n*. Les choses se passent de même avec une dissolution métallique quelconque.

Sur une plaque de verre (Fig. 262), M. Faraday dépose trois petites bandes de papier imbibées de dissolutions

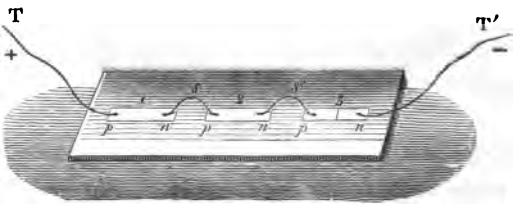


Fig. 262.

salines. La bande 1 est mouillée avec une dissolution d'iodure de potassium dissous dans l'amidon; la bande 2

est imbibée d'une dissolution de sulfate de soude et colorée *en bleu* avec la teinture de *tournesol;* enfin la bande 3, imbibée aussi d'une dissolution de sulfate de soude, est colorée en *bleu de tournesol* dans sa moitié *p*, et en *jaune de curcuma* dans sa moitié *n*. La bande 1 communique avec la machine par le fil de platine T, et la bande 3 avec le sol par le fil de platine T'; deux arcs de platine *s*, *s'* complètent le circuit. Lorsque la machine est mise en action, un flux d'électricité *positive* traverse le système de T en T', *sans étincelle;* toutes les dissolutions salines sont immédiatement décomposées. Dans la bande 1, l'iode mis en liberté bleuit l'amidon autour du pôle positif *p;* dans la bande 2, l'acide sulfurique se montre autour du pôle positif *p*, et rougit le tournesol; dans la bande 3, l'acide sulfurique rougit aussi le tournesol autour du pôle positif *p*, mais, de plus, la soude se montre au pôle négatif *n* et traduit sa présence en ce point par une tache *rouge* sur le papier coloré en *jaune de curcuma.*

M. Faraday a donné à ces expériences une forme plus saisissante. Sur une lame de verre (Fig. 263), il a placé cinq petites bandes de papier imbibées d'une dissolution de sulfate de soude. Ces petites bandes sont taillées en pointe, la première et la dernière débordent un peu la lame de verre. Dans chacune de ces bandes, la moitié *b* est colorée en *bleu de tournesol*, la moitié *a* en *jaune de curcuma.* En face de la première bande est placée une pointe de platine *p* qui communique avec le conducteur de la machine par la tige métallique T; en face de la dernière bande est également placée une pointe de platine *n* qui communique avec le sol par la tige métallique T'. Quand la ma-

chine est en action, l'électricité positive part de la pointe *p*, traverse l'air, pénètre dans la première bande par l'extrémité *b* et en sort par l'extrémité *a*; l'électricité positive, après avoir successivement parcouru les cinq bandes entrant par les extrémités *b* et sortant par les extrémités *a*, traverse l'air une seconde fois pour aller à la pointe *n*, gagner

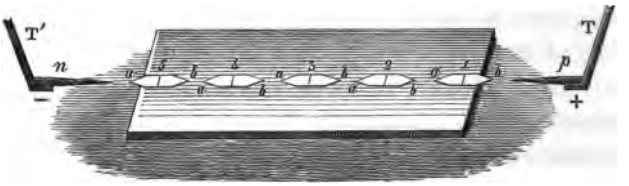


Fig. 263.

la tige T', et se perdre dans le sol. Dans chacune de ces bandes de papier, l'extrémité *b*, par laquelle elle reçoit l'électricité positive, représente donc le pôle *positif*, et l'extrémité *a* représente le pôle *négatif*. Lorsque la machine a marché pendant un certain temps et que l'électricité a traversé le système *sans étincelle*, on remarque, sur chaque bande, deux taches rouges. L'une est en *b* au pôle *positif*, et accuse la présence de l'acide sulfurique qui a réagi sur le bleu de tournesol; l'autre est en *a* au pôle *négatif*, et accuse la présence de la soude qui a rougi la teinture de curcuma.

Ces expériences de M. Faraday montrent qu'il y a une identité complète entre les propriétés électrolytiques des *courants voltaïques* et celles des *décharges obscures* d'électricité statique. Mais, en outre, pour traverser le système

entier, l'électricité, dans cette dernière expérience, a dû être transmise par l'air dans certaines portions de son trajet; il résulte donc de ces faits que les couches d'air placées entre les pointes métalliques et les bandes extrêmes et entre deux bandes successives jouent, dans cette série de décompositions, le rôle de véritables *électrodes* à la surface desquelles viennent se déposer les corps séparés et mis en liberté par l'électrolysation.

Dans une lettre à M. Faraday (1), M. Armstrong annonce que, avec les décharges de sa puissante machine hydro-électrique, il est parvenu à reproduire tous les phénomènes électro-chimiques des courants voltaïques. Après ces dernières expériences, il n'est plus possible de conserver aucun doute sur l'identité absolue des *courants* fournis par les piles et des *décharges obscures* des machines électriques.

Il y a donc une différence notable entre les propriétés chimiques des décharges *obscures* et celles des décharges *lumineuses* d'électricité statique. Les premières décomposent les corps, et séparent leurs éléments comme les courants voltaïques; les expériences de Wollaston confirmées par les observations de Davy montrent que, quand la décharge est accompagnée d'une étincelle, les produits de la décomposition sont mis en liberté dans chaque point du corps traversé et restent toujours mélangés.

Morgan (2) était parvenu à décomposer l'alcool et les huiles en les soumettant à une série de fortes étincelles

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1844, t. X, p. 105.
(2) *Bibliothèque britannique*, 1799, t. XII, p. 3 et suiv.

fournies par des bouteilles de Leyde, et toujours les produits de la décomposition étaient restés mélangés.

Davy avait obtenu des décompositions du même genre en faisant passer l'*étincelle voltaïque* à travers des liquides conducteurs et des liquides isolants. M. Melli (1) a repris l'étude de cette action de l'étincelle voltaïque; ses recherches l'ont conduit à conclure que, si le courant voltaïque décompose les électrolytes avec *séparation* des éléments à la surface des électrodes, l'*étincelle voltaïque* agit comme l'*étincelle* fournie par les appareils d'*électricité statique*, décompose les corps, mais *ne sépare pas* leurs éléments. Ces observations de M. Melli portent à penser que les effets chimiques de l'*étincelle* doivent être rapportés à l'élévation considérable de température qui l'accompagne toujours.

Le mémoire de M. Grove, dont nous avons parlé plus haut, contient des expériences qui sont la justification directe de cette interprétation des phénomènes de décomposition produits par l'étincelle électrique.

M. Masson (2) a étudié l'action chimique de l'*étincelle* fournie par l'appareil d'induction de Ruhmkorff; il est parvenu à décomposer ainsi l'eau, l'alcool ordinaire, l'éther anhydre, et le sulfure de carbone. Il s'est assuré aussi que l'*étincelle voltaïque* agit de la même manière. Dans les décompositions qu'il a obtenues avec ces diverses *étincelles*, les éléments constituants des corps en expérience n'ont jamais été *séparés*, et sont toujours restés *mélangés*.

Ainsi donc les propriétés chimiques de l'électricité

(1) *Archives de l'électricité*, 1841, t. I, p. 297.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1855, t. XLV, p 443.

sont indépendantes de son origine; mais le mode de décomposition des corps traversés par l'électricité varie avec son mode de transmission :

1° Si l'électricité passe sous forme de *courant obscur, sans étincelle*, il y a véritable électrolysation. Le corps est décomposé, ses éléments sont *séparés* et ne sont mis en liberté qu'à la surface des électrodes, c'est-à-dire autour des points par lesquels l'électricité pénètre dans le corps et en sort. Ce mode de propagation de l'électricité dans les corps décomposables est la *transmission électrolytique* de M. Faraday.

2° Si l'électricité passe sous forme d'*étincelle* ou par *transmission disruptive*, elle agit uniquement comme *source de chaleur*. Le corps est décomposé, mais les produits de la ségrégation ne sont pas *séparés;* ils sont mis en liberté dans chacun des points du trajet de l'étincelle, et restent toujours *mélangés*.

ARTICLE III.

DE L'OZONE.

Dans l'air en contact avec les conducteurs d'une machine électrique en activité, il se développe une *odeur* particulière comparée par les uns à celle de l'acide sulfureux, par les autres à celle du phosphore. Cette odeur, remarquée de tout temps par les physiciens, avait attiré l'attention de Van-Marum qui rapporte, dans son ouvrage, des expériences très remarquables sur ce sujet. Ayant fait passer de très fortes étincelles à travers de l'oxygène

contenu dans un tube de verre, il observa que le gaz avait contracté une *odeur très prononcée qui lui parut être celle de la matière électrique*, et avait, en outre, acquis la propriété d'agir très activement sur le mercure et de se combiner avec lui. Ces résultats furent attribués à la présence de quelques traces d'acide azotique formé par la combinaison de l'oxygène avec un peu d'azote qui serait resté mêlé à ce gaz, et furent à peu près complétement oubliés.

En 1840 (1), M. Schœnbein constata que, pendant l'électrolysation de l'eau, il se développe, autour et au-dessus de l'électrode positive de platine, une odeur semblable à celle de l'air en contact avec les conducteurs de la machine électrique, et publia un travail remarquable sur les causes et l'origine de cette odeur particulière. D'après les premières expériences de ce physicien :

1° Cette odeur continue à être sensible même après la cessation du courant voltaïque dirigé à travers l'eau.

2° Cette odeur n'est émise que du côté de l'électrode positive. L'oxygène recueilli dans une cloche est fortement odorant, rien de semblable n'existe pour l'hydrogène.

3° Cette odeur n'est sensible que lorsque l'électrode positive est de *platine* ou d'*or;* avec les métaux oxydables employés comme électrode positive il n'y a pas d'odeur sensible.

4° L'eau mélangée avec de l'acide sulfurique, de l'acide azotique pur, ou de l'acide phosphorique, fournit, du côté

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1840, t. XXVIII, p. 342.

de l'électrode positive, de l'oxygène fortement odorant. Dans l'électrolyse de *certaines* solutions salines *oxygénées*, il se dégage aussi de l'oxygène odorant; on n'obtient rien de semblable avec les dissolutions de bromures, de chlorures, ou d'iodures métalliques.

5° L'oxygène et le mélange détonant fournis par l'électrolysation de l'eau gardent indéfiniment cette odeur, quand on a soin de les conserver dans des flacons de verre bien fermés.

6° Pour dépouiller complétement l'oxygène de cette odeur, il suffit de faire tomber dans le vase où il a été recueilli quelques pincées de charbon en poudre, ou de limaille d'un métal oxydable, ou quelques gouttes de mercure, et d'agiter le mélange.

7° Une simple élévation de température suffit pour enlever son odeur à l'oxygène fourni par l'électrolyse; aussi ne se développe-t-il point d'odeur quand on chauffe le liquide électrolysé.

8° Des lames bien desséchées d'or et de platine introduites, à la température ordinaire, dans des flacons pleins d'oxygène *odorant* sont fortement *polarisées*. Les lames de platine et d'or se polarisent de la même manière quand on les tient en face d'une pointe qui donne écoulement à l'électricité de tension. Cet état polaire de l'or et du platine persiste quelque temps, quand ces métaux sont exposés à l'air atmosphérique ordinaire. L'oxygène dépouillé de son odeur par un moyen quelconque ne *polarise* ni l'or ni le platine.

9° Il suffit de chauffer la lame polarisée pour qu'elle retombe immédiatement à l'état neutre; on lui fait aussi

perdre sa polarité en la tenant quelque temps plongée dans un flacon plein d'hydrogène.

10° Les lames de platine et d'or ne se polarisent pas quand on les plonge *humides* ou *chaudes* dans l'oxygène odorant, ou quand on les présente dans le même état à une pointe donnant écoulement à de l'électricité de tension.

M. Schœnbein, sans se prononcer sur la nature de cette substance odorante mêlée à l'oxygène recueilli à la surface de l'électrode positive, lui donna le nom d'*ozone* qui a été généralement adopté.

Dans un second travail sur le même sujet (1), M. Schœnbein arriva aux conclusions suivantes :

1° L'ozone est insoluble dans l'eau. Il détruit promptement les couleurs organiques, les matières ligneuses et albumineuses, etc.

2° L'ozone transforme les acides sulfureux et azoteux en acides sulfurique et azotique. L'air atmosphérique *ozonisé*, en présence d'une forte base et de l'eau, forme un azotate.

3° L'ozone attaque la plupart des métaux, et les fait passer au maximum d'oxydation.

4° Dans un grand nombre de cas, l'ozone se comporte exactement comme les peroxyde de plomb, de manganèse, et d'argent.

5° L'ozone décompose l'iodure de potassium et met l'iode à nu ; une bande de papier amidonné imbibée d'iodure de potassium passe au bleu au contact de l'ozone.

(1) *Archives de l'électricité*, 1845, t. V, p. 11 et 337.

Cette dernière réaction est un excellent moyen de constater la présence de ce corps.

M. Schœnbein conclut de tous ces faits que l'*ozone* est un oxyde d'hydrogène plus oxygéné que le bi-oxyde ou eau oxygénée.

Suivant M. Schœnbein, on obtient des quantités considérables d'*ozone* en laissant de l'oxygène ou de l'air *humides* en contact avec du phosphore à la température de 20 à 25 degrés. Le gaz prend alors l'odeur et toutes les propriétés de l'oxygène fourni par l'électrolyse de l'eau, ou soumis à une série d'étincelles électriques.

MM. De la Rive et Marignac (1) ont fait une étude spéciale des phénomènes annoncés par M. Schœnbein. Leur travail confirme l'exactitude de la plupart de ses observations, et contient aussi quelques faits nouveaux. Ainsi :

1° La production de l'ozone pendant l'électrolysation de l'eau est complétement indépendante de la présence de l'azote; mais, pour que l'oxygène soit *ozonisé*, il ne faut pas que l'appareil de décomposition s'échauffe.

2° L'air *sec* en contact avec le phosphore ne produit pas d'ozone, il en est de même de l'azote, de l'oxygène, de l'hydrogène, et de l'acide carbonique *purs*. On obtient de l'ozone en faisant passer sur du phosphore un courant d'air *humide;* un mélange d'oxygène et d'acide carbonique ou d'oxygène et d'hydrogène se conduit absolument comme l'air.

3° L'ozone est absorbé par les métaux. L'argent poreux s'oxyde dans l'air *ozonisé*. Mais, pour que cette réaction

(1) *Archives de l'électricité*, 1845, t. V, p. 3.

ait lieu, il faut que l'air soit *humide*. Dans l'air *ozonisé sec*, l'argent, le cuivre et le zinc lui-même n'éprouvent aucune altération.

Les résultats les plus remarquables du travail de MM. De la Rive et Marignac sont ceux qu'ils ont obtenus en soumettant de l'air ou de l'oxygène à l'action de décharges électriques. Ils ont prouvé que :

1° Quand l'air est soumis à une série de décharges électriques (peu importe que la décharge se fasse par une succession d'étincelles ou par un écoulement continu et invisible), l'ozone se développe. L'expérience réussit également avec de l'air parfaitement *sec*, ou avec de l'air *humide*.

2° Dans l'acide carbonique *pur*, sec ou humide, il ne se développe point d'ozone. Il suffit de la présence d'une très petite quantité d'oxygène libre pour que l'ozone prenne naissance.

3° L'ozone se développe avec la plus grande facilité dans l'oxygène parfaitement *pur* et *sec*, sous l'influence d'une série de décharges électriques.

MM. De la Rive et Marignac ont conclu de ces derniers faits que l'oxygène est susceptible, dans certaines circonstances, de subir une modification particulière qui exalte ses affinités chimiques, et le rend apte à se combiner directement avec des corps sur lesquels il n'exerce pas d'action à l'état ordinaire. L'*ozone* ne serait que de l'oxygène dans cet *état allotropique*. M. Schœnbein paraît avoir adopté lui-même cette manière de voir.

Le rôle de l'électricité dans la production de l'ozone a été étudié avec beaucoup de soin par MM. E. Becquerel et

Fremy (1). Ils ont successivement étudié l'influence de l'arc voltaïque, des étincelles de l'appareil d'induction, et des décharges de la machine électrique. Leurs résultats confirment ceux de MM. Schœnbein, Marignac et De la Rive; ils montrent que l'ozone est un agent d'oxydation d'une très grande énergie. Leur mémoire contient, en outre, des faits nouveaux qui peuvent servir à élucider cette question délicate d'électro-chimie. Il résulte de leurs recherches que :

1° L'arc *voltaïque* ne développe pas de traces sensibles d'*ozone* dans l'oxygène qu'il traverse. Mais cet arc, entraînant avec lui des particules de platine très divisées, agit sur les mélanges gazeux, et combine directement l'oxygène avec l'azote pour former de l'acide azotique, l'hydrogène avec l'azote pour faire de l'ammoniaque, l'acide sulfureux avec l'oxygène pour produire de l'acide sulfurique.

2° Les étincelles fournies par l'appareil d'induction de Ruhmkorff se comportent exactement comme celles de la machine électrique, elles produisent de l'ozone dans l'oxygène qu'elles traversent.

3° Pour que les étincelles de la machine électrique produisent de l'*ozone*, il n'est pas nécessaire qu'elles traversent l'oxygène; il suffit qu'elles *lèchent extérieurement* les parois des tubes de verre dans lesquels l'oxygène est enfermé. L'ozone, dans ce cas, est le résultat de l'électrisation de l'oxygène à distance ou par *influence*.

Tous ces faits, et surtout cette dernière expérience, prouvent bien évidemment que, sous l'influence des dé-

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1852, t. XXXV, p. 62.

charges électriques, l'oxygène prend un *état allotropique* dans lequel ses propriétés chimiques sont exaltées.

M. Baumert (1), dans un travail important publié sur cette question, a cherché à établir qu'il y a une grande différence entre l'ozone qui accompagne l'oxygène dégagé à la surface de l'électrode positive pendant la décomposition de l'eau et l'oxygène modifié par les étincelles électriques. Pour lui, le *corps oxydant* qui accompagne l'oxygène mis en liberté pendant l'électrolysation serait un oxyde d'hydrogène de la formule HO^3, et mériterait *seul* le nom d'ozone. L'action des étincelles électriques se bornerait à faire passer une partie de l'oxygène à un *état allotropique* dans lequel ce gaz aurait la faculté de réagir sur l'eau, de lui communiquer un degré supérieur d'oyxdation, et de produire ainsi l'ozone HO^3. Cette théorie de M. Baumert, si elle était adoptée, expliquerait pourquoi l'oxygène modifié par les étincelles électriques n'attaque les métaux qu'en présence de l'eau.

Enfin M. Andrews (2) a repris, dans un travail très remarquable, l'étude de la constitution et des propriétés de l'ozone. Ses expériences ont établi d'une manière incontestable que :

1° Dans l'électrolyse de l'eau, il ne se forme aucun composé gazeux renfermant HO^3;

2° L'ozone, quelle que soit son origine, est un seul et même corps possédant des propriétés identiques et la même constitution ; ce n'est pas un corps composé, mais de l'oxygène dans un état particulier ou *allotropique*.

(1) *Ann. de chim et de phys.*, 3e série, 1853, t. XXXIX, p. 477.
(2) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, 1856, t. XLVII, p. 181.

En terminant cette histoire de l'ozone, nous devons mentionner ici un fait d'une grande importance pour les recherches relatives aux lois de l'intensité des courants voltaïques. M. Meidinger (1) a montré que toutes les circonstances qui favorisent la formation de l'ozone pendant l'électrolyse facilitent, en même temps, la production de l'eau oxygénée. Or, cette production d'eau oxygénée est la cause des inexactitudes des indications des voltamètres chimiques. Nous reprendrons cette question avec tous les détails convenables, quand nous nous occuperons des appareils propres à mesurer l'intensité des courants.

M. Osann (2) a fixé son attention sur les propriétés de l'hydrogène dégagé au pôle négatif du courant électrique. Ses expériences tendent à établir que, de même que l'oxygène peut exister à l'état d'ozone et prendre alors des affinités beaucoup plus énergiques, de même aussi l'hydrogène obtenu par voie électrolytique jouit d'une *faculté de réduction* beaucoup plus considérable que l'hydrogène préparé par les méthodes ordinaires.

ARTICLE IV.

LOIS DES DÉCOMPOSITIONS ÉLECTRO-CHIMIQUES.

Les beaux travaux de M. Faraday sur les propriétés chimiques de l'électricité dynamique l'ont conduit à la découverte des lois des décompositions électro-chimiques.

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1854, t. XXV, p. 170.
(2) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1855, t. XXX, p. 336.

L'appareil dont il a fait usage pour mesurer la *force chimique* du courant est le voltamètre représenté page 473, fig. 253; les électrodes sont des fils ou des lames de platine, et l'eau soumise à l'action décomposante de l'électricité est rendue *conductrice* par l'addition de proportions déterminées d'acide sulfurique. Nous exposerons plus tard les conditions auxquelles on doit satisfaire, tant dans les dispositions de l'appareil que dans la manière de recueillir et de mesurer le gaz, pour que le voltamètre donne de bonnes indications; nous supposons que, dans les expériences suivantes, toutes ces conditions sont remplies.

Dans le circuit d'un courant et en divers points de son trajet, on place (1) plusieurs voltamètres *semblables* dont l'eau contient une *même* proportion d'acide sulfurique. Le volume des gaz recueillis dans les éprouvettes est *partout le même*, et, par conséquent, la quantité d'eau décomposée est *partout la même*. L'égalité d'action chimique dans les divers voltamètres subsiste encore lorsque l'étendue de la *surface* des électrodes de platine et le *degré de concentration* de la dissolution acide changent d'un appareil à l'autre.

Pour rendre l'eau conductrice, on peut substituer à l'acide sulfurique de la potasse, de la soude, ou un sel alcalin tel que le sulfate de soude ou de potasse. Si l'on place, en divers points du circuit traversé par un courant, une série de voltamètres dont les uns contiennent une dissolution acide, les autres une dissolution alcaline, et d'autres enfin une dissolution saline, on trouve, après l'interruption du courant, que la *même quantité de*

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 206.

gaz a été dégagée, et, par conséquent, que la *même quantité d'eau* a été décomposée dans tous ces appareils. Ces faits prouvent évidemment que :

Le pouvoir chimique d'un courant, mesuré par la quantité d'eau décomposée, est le même dans tous les points du circuit qu'il traverse.

Dans les expériences précédentes, c'est une même substance, l'eau, qui est attaquée par le courant dans les divers points de son trajet. Mais, puisque le pouvoir chimique du courant est partout le même, il est évident que, si l'on forçait l'électricité à traverser successivement un voltamètre à eau, et des appareils analogues dans lesquels d'autres corps que l'eau soient décomposés, l'action décomposante exercée sur l'eau et sur les autres électrolytes serait le résultat de la mise en jeu d'une *même quantité de force électro-chimique.* M. Faraday (1), en opérant de cette manière, a découvert une des lois les plus fécondes et les plus importantes de l'électro-chimie.

L'acide chlorhydrique concentré soumis à l'électrolyse fournit, du côté de l'électrode positive, du *chlore pur* sans la moindre trace d'oxygène; ce résultat annonce que l'action du courant porte tout entière sur l'acide, et que l'eau n'est pas décomposée. Quand, sur le trajet d'un courant, on place deux voltamètres dont l'un contient une solution étendue d'acide sulfurique, et l'autre une solution concentrée d'acide chlorhydrique, on obtient de part et d'autre le même volume d'hydrogène, et les quantités d'oxygène et de chlore recueillis sont exactement dans les rapports

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 230.

de leurs équivalents chimiques. Une dissolution concentrée d'acide iodhydrique donne les mêmes résultats.

M. Faraday a soumis à la même épreuve d'autres corps composés et, pour éviter les perturbations résultant des effets secondaires déterminés par la présence de l'eau, il a opéré sur des corps maintenus à l'état de fusion ignée. Plusieurs chlorures, iodures et oxydes métalliques ont été placés ainsi dans le circuit d'un courant qui, en même temps, traversait un voltamètre à eau acidulée. Nous nous contenterons d'indiquer le procédé expérimental adopté pour le protochlorure d'étain; la même marche a été suivie dans les expériences relatives aux autres électrolytes fondus par la chaleur.

A travers le bout fermé d'un tube de verre V (Fig. 264), on fait passer un fil de platine N. Le fil est scellé à chaud dans les parois du tube, et l'extrémité qui fait saillie à l'intérieur est élargie pour présenter plus de surface. On remplit le tube à moitié de protochlorure d'étain *fondu* que l'on maintient à l'état de *fusion* avec une lampe à alcool. Dans le liquide, on plonge à travers la partie ouverte du tube un second fil de platine P. Quand un courant électrique dirigé à travers le chlorure fondu marche de P en N, le chlorure est décomposé, le chlore se dégage à la surface de l'électrode positive P, et l'étain se précipite sur l'extrémité élargie de l'électrode négative N. Au moyen de deux pesées faites l'une avant et l'autre après l'opération, il est facile de déterminer le poids du métal déposé sur le fil N, et d'en déduire la quantité de chlorure décomposé.

On place dans un circuit voltaïque un voltamètre à eau

acidulée et deux appareils semblables au précédent; l'un de ces tubes contient du protochlorure d'étain, et l'autre du chlorure de plomb. On dispose, d'ailleurs, les contacts de manière que le courant arrive toujours par la partie supérieure du chlorure fondu, et sorte par le fil soudé au

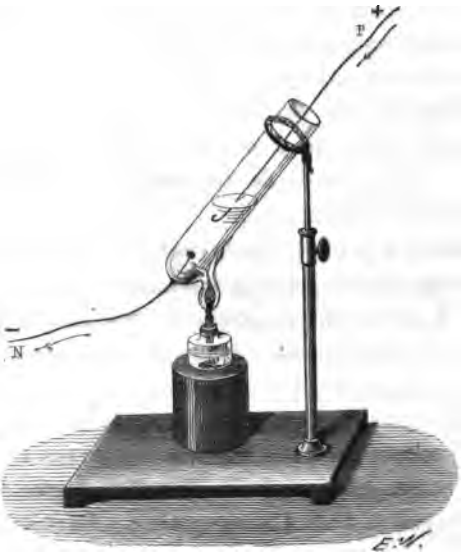


Fig. 264.

bout fermé du tube. Quand l'opération est terminée, on détermine d'une part le poids de l'hydrogène recueilli dans le voltamètre, et d'autre part les poids de l'étain et du plomb précipités dans les deux appareils à décomposition; l'expérience montre que ces *trois poids* sont exactement dans les mêmes rapports que les *équivalents chimiques* de l'hydrogène, de l'étain et du plomb.

M. Faraday a opéré de la même manière sur beaucoup de composés binaires contenant *un équivalent* de chacun des corps élémentaires; dans tous les cas, les résultats ont été les mêmes. De ces expériences, M. Faraday a déduit cette loi simple et remarquable :

Lorsqu'un courant voltaïque traverse une série d'électrolytes binaires contenant *un équivalent* de chacun des corps élémentaires, les quantités d'éléments séparés dans ces électrolytes sont dans les mêmes rapports que leurs équivalents chimiques; ou, en d'autres termes, les quantités décomposées de ces divers électrolytes sont chimiquement équivalentes.

M. Daniell a publié (1) un travail important sur les décompositions électro-chimiques. Il résulte de ses recherches que la loi précédente s'applique aussi à l'électrolysation des sels métalliques neutres dont la base est composée d'*un* équivalent d'oxygène et d'*un* équivalent de métal.

Pour le démontrer, on place, dans le circuit du courant, un voltamètre à eau acidulée, et un vase à décomposition contenant une solution de sulfate neutre de protoxyde de cuivre, CuO. Les quantités pondérales d'hydrogène recueilli dans le voltamètre, et de cuivre précipité sur l'électrode négative du vase à décomposition sont, après l'opération, dans les mêmes rapports que leurs équivalents chimiques.

Avec d'autres sels métalliques tels que les sels d'argent et de plomb, nous avons vu précédemment que tout le

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1839, t. XXIV, p. 386. — *Archives de l'électricité*, 1841, t. I, p. 591.

métal du sel décomposé ne se dépose pas sur l'électrode négative; dès lors les résultats ne sont pas aussi nets qu'avec le sulfate de cuivre. Cependant, quand on tient compte de ces actions secondaires, on arrive toujours à cette conclusion que, pour *un* équivalent d'eau décomposée dans le voltamètre, il y a *un* équivalent de sel métallique détruit dans le vase à décomposition.

Mais que se passe-t-il quand le métal du sel a la propriété de décomposer l'eau à froid? Les expériences de M. Daniell ont parfaitement élucidé cette question intéressante. Supposons que, dans le circuit d'un courant voltaïque, on place :

1° Un voltamètre à eau acidulée.

2° Un vase à décomposition partagé en deux cellules distinctes par une cloison poreuse. Les deux cellules sont remplies d'une dissolution de sulfate de soude; la cloison laisse passer le courant, mais ne permet pas aux liquides de se mêler. Enfin, la cellule positive et la cellule négative contiennent, chacune, une éprouvette destinée à recueillir les gaz dégagés pendant l'opération.

3° Un tube de verre contenant du chlorure de plomb tenu en fusion avec une lampe à esprit-de-vin.

Le courant traverse successivement ces trois appareils dans l'ordre que nous avons indiqué. Après l'opération, pour *un* équivalent d'oxygène et *un* équivalent d'hydrogène mis en liberté dans le voltamètre, on trouve : — 1° *un* équivalent d'oxygène dans l'éprouvette de la cellule positive, et *un* équivalent d'acide sulfurique *libre* dans le liquide de cette cellule ; — 2° *un* équivalent d'hydrogène dans l'éprouvette de la cellule négative, et *un* équivalent de soude

libre dans le liquide de cette cellule; — 3° *un* équivalent de plomb précipité dans le tube à chlorure de plomb fondu.

Au premier abord, ces faits semblent indiquer que le même courant n'a pas produit le même travail chimique dans les trois appareils successifs qu'il a traversés. En effet, tandis que, dans les appareils extrêmes, *un seul* équivalent d'eau et *un seul* équivalent de chlorure de plomb ont été décomposés, nous trouvons que, dans l'appareil intermédiaire, il y a eu *deux* équivalents décomposés, un d'eau et l'autre de sulfate de soude. Si l'eau et le sel de l'appareil à sulfate de soude avaient tous les deux été décomposés par l'action *directe* du courant, il faudrait donc admettre cette supposition inadmissible que le courant, dans le vase à deux cellules, avait une *force chimique double* de celle qu'il possédait dans le voltamètre à eau qui le précédait et dans le tube à chlorure de plomb fondu qui le suivait. Il résulte évidemment de ce rapprochement que, dans le vase intermédiaire à deux cellules, le *seul effet direct* du passage du courant est la décomposition d'*un* équivalent de sulfate de soude et la mise à nu d'*un* équivalent de sodium. La décomposition de l'eau n'est qu'un *effet secondaire* dû à l'action du sodium sur l'eau de la dissolution.

M. Daniell a successivement remplacé le sulfate de soude par du sulfate de potasse, du nitrate de potasse, du chlorure de sodium, et les résultats ont toujours été les mêmes.

La loi précédente de M. Faraday ne s'applique donc pas seulement aux composés binaires contenant *un* équivalent de chacun des corps élémentaires, elle s'étend aux disso-

lutions des sels métalliques neutres dont la base contient *un* équivalent d'oxygène et *un* équivalent de métal. Nous pouvons dire que :

Quand un courant traverse de l'eau acidulée et une série de dissolutions salines neutres dont la base contient *un* équivalent d'oxygène et *un* équivalent de métal, pour *chaque* équivalent d'eau décomposée ou d'hydrogène dégagé dans le voltamètre, il y a *un* équivalent de sel décomposé ou de métal précipité dans chacune des dissolutions salines.

Antérieurement à M. Daniell, M. Matteucci avait étendu la loi de M. Faraday aux sels neutres dont la base contient *un* équivalent d'oxygène et *un* équivalent de métal, tantôt en opérant sur des dissolutions salines (1), tantôt en faisant passer le courant à travers de l'acétate de plomb, du nitrate d'argent, et du borate de plomb liquéfiés par la chaleur (2). D'ailleurs, en montrant que les sels anhydres et à l'état de fusion ignée fournissent les mêmes résultats que leurs dissolutions aqueuses, M. Matteucci établissait nettement que l'électrolysation des sels n'est pas un *effet secondaire* dû à l'action de l'hydrogène de l'eau décomposée, mais un *effet direct* du courant lui-même. Le même physicien a fait (3), sur la décomposition électrochimique des sels à base organique, des recherches qui tendent à démontrer que la même loi leur est applicable.

En même temps qu'il mesurait les quantités pondérales

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1835, t. LVIII, p. 78.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1839, t. LXXI, p. 109.— *Bibliothèque universelle de Genève*, 1839, t. XXI, p. 153.

(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1840, t. LXXIV, p. 105.

des éléments mis en liberté par le passage du courant à travers les divers électrolytes, M. Matteucci fixait son attention sur les actions chimiques *génératrices du courant* accomplies dans les couples de la pile. Il a trouvé ainsi qu'il existe une égalité parfaite entre cette *action chimique génératrice* du courant localisée dans le couple et le *pouvoir chimique* du courant manifesté par la décomposition de l'électrolyte dans le circuit interpolaire (1). Il résulte, en effet, de ses recherches que :

1° Dans une pile en action, il y a dans chaque couple une même quantité de métal *positif* dissous ou d'*hydrogène* mis en liberté à la surface du métal négatif.

2° Pour *chaque* équivalent de métal positif dissous ou d'hydrogène dégagé dans le couple, il y a *un* équivalent de métal précipité ou d'hydrogène dégagé dans l'électrolyte soumis à l'action du courant. Ces résultats sont complétement indépendants de la *nature* du métal employé comme élément positif dans le couple. La nature du métal positif n'a d'influence que sur la rapidité avec laquelle s'opèrent, d'une part sa dissolution dans le couple, et d'autre part la décomposition de l'électrolyte; mais, dans tous les cas, ces actions chimiques conservent leurs mêmes rapportsd'intensité.

Dans une lettre adressée à M. Faraday, publiée dans les *Transactions philosophiques*, 1836, M. Daniell annonce avoir constaté que, dans une pile de zinc amalgamé et de platine, le volume de l'hydrogène dégagé sur le platine

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1835, t. LVIII, p. 76 et 79; 1839, t. LXXI, p. 90.

de chaque couple est égal à celui de l'hydrogène recueilli dans un voltamètre à eau placé dans le circuit interpolaire. — M. Grove, en 1843, a obtenu les mêmes résultats avec la pile qui porte son nom. — MM. Boquillon et Silbermann (1) ont fait passer le courant fourni par un grand couple de Smée à travers une dissolution de sulfate de cuivre ; ils ont constaté que le poids de l'hydrogène dégagé à la surface du platine du couple et le poids du cuivre précipité par l'action électrolytique du courant étaient dans les rapports de leurs équivalents chimiques. — M. Despretz (2), dans ses importantes recherches sur les effets du courant voltaïque, a mesuré le travail *intérieur* et le travail *extérieur* de la pile de Bunsen et de la pile de Daniell. Il résulte de ses expériences que, dans ces deux électromoteurs, le *travail chimique intérieur, générateur du courant, est équivalent au travail extérieur de décomposition effectué par le courant.*

Tous ces faits déposent en faveur de la doctrine de l'origine chimique de la force électromotrice du couple voltaïque, et sont la confirmation directe des deux principes suivants posés, dès 1834, par M. Faraday (3) :

1° La dissolution d'*un* équivalent de zinc dans le couple donne assez d'électricité pour décomposer électrolytiquement *un* équivalent d'eau.

2° L'électricité nécessaire pour décomposer un poids donné d'un électrolyte quelconque est égale, en quantité,

(1) Pouillet, *Éléments de physique*, 4e édition, t. I, p. 752.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1851, t. XXXIII, p. 185.

(3) *Experimental Researches*, t. I, p. 256.

à celle que développerait la décomposition du même poids de cet électrolyte.

Il restait encore une question importante à résoudre : Que se passe-t-il dans le cas d'un électrolyte binaire dont les éléments constituants ne sont plus représentés par des nombres *égaux* d'équivalents? Déjà M. Matteucci (1), en soumettant à l'action du même courant une dissolution du chlorure de cuivre de la formule Cu^2Cl et une dissolution du chlorure de la formule CuCl, avait vu que le poids du métal précipité dans la première dissolution était *double* de celui qu'il avait recueilli sur l'électrode négative de la seconde dissolution. Mais ces résultats ne s'accordaient pas avec ceux qu'il avait obtenus en opérant sur le chlorure d'antimoine. M. Edmond Becquerel a publié, dans ces derniers temps, un travail important (2) qui a complétement élucidé cette question intéressante d'électrochimie.

M. E. Becquerel a agi sur des chlorures, des iodures, et des oxydes métalliques dissous dans l'eau, dans les acides ou dans l'ammoniaque. Il résulte de ses recherches que la quantité de métal précipité varie avec la composition des corps binaires, mais que, pour *un* équivalent d'eau décomposée dans le voltamètre, il y a toujours *un* équivalent de chlore, d'iode ou d'oxygène mis en liberté dans l'électrolyte binaire. Ainsi, par exemple :

Pour *un équivalent* d'eau décomposée dans le voltamètre,

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1839, t. XXI, p. 160.
(2) *Ann. de chim. et de phy.*, 3e série, 1844, t. XI, p. 162 et 257.

Un chlorure de la formule RCl donne *un équivalent* de chlore et *un équivalent* de métal ;

Un chlorure de la formule R^2Cl donne *un équivalent* de chlore et *deux équivalents* de métal ;

Un chlorure de la formule RCl^2 donne *un équivalent* de chlore et *un demi équivalent* de métal ;

Un chlorure de la formule R^2Cl^3 donne *un équivalent* de chlore et *deux tiers d'équivalent* de métal ;

Un chlorure de la formule R^2Cl^5 donne *un équivalent* de chlore et *deux cinquièmes d'équivalent* de métal.

Les iodures et les oxydes se conduisent comme les chlorures.

Dans l'électrolyse des composés binaires, ce n'est donc pas l'*élément métallique* ou *électro-positif* qui commande le phénomène ; la quantité de matière décomposée est régie par cette loi générale :

Un courant voltaïque qui traverse une série d'électrolytes binaires les décompose en proportions telles que les poids des éléments électro-négatifs (oxygène, chlore, iode, etc.) mis en liberté dans les divers points de son trajet sont dans les rapports de leurs équivalents chimiques.

Dans le même travail, M. Ed. Becquerel a étudié l'action du courant électrique sur les sels métalliques dont les éléments de la base ne sont plus dans le rapport simple d'*un* équivalent d'oxygène pour *un* équivalent de métal, et aussi sur les sels métalliques *basiques*. Il a vu que, dans ces cas divers, pour *un* équivalent d'eau décomposée dans le voltamètre, c'est toujours *un équivalent* d'acide qui est mis en liberté dans la dissolution saline ;

en sorte que les proportions de métal précipité sur l'électrode négative et d'oxygène dégagé à la surface de l'électrode positive sont variables, et dépendent à la fois de la composition de la base et de la composition du sel.

Des belles recherches de M. Faraday, complétées par celles de MM. Matteucci, Daniell, Ed. Becquerel, il résulte que :

1° L'action chimique d'un courant voltaïque sur un corps composé mesurée par la quantité pondérale de l'*élément électro-négatif* (acide, oxygène, chlore, iode, brome, etc.) mis en liberté est une *action définie*.

2° Quand un courant voltaïque traverse une série d'électrolytes, les décompositions s'effectuent dans des proportions telles que les quantités pondérales des *éléments électro-négatifs* mis en liberté dans les diverses portions du circuit sont dans les rapports de leurs équivalents chimiques.

Les lois de l'action *définie* du courant électrique s'étendent aussi aux cas dans lesquels l'électricité traverse un mélange de plusieurs électrolytes, et les décompose tous à la fois. C'est ce que M. Ed. Becquerel a exprimé en disant :

« Lorsqu'un courant électrique traverse simultanément » une combinaison chimique binaire et un mélange de » deux ou plusieurs combinaisons chimiques binaires, et » que ces dernières sont décomposées ensemble par le » courant, la décomposition se fait toujours en propor- » tions définies, de telle sorte que la somme des quotients » obtenus en divisant les poids des éléments électro-né- » gatifs transportés au pôle positif dans le mélange, par

» leurs équivalents chimiques respectifs, est toujours égale
» au quotient du poids de l'élément électro-négatif trans-
» porté au pôle positif, dans la combinaison binaire seule,
» par son équivalent chimique. »

Ce dernier principe est une déduction naturelle de la belle découverte de M. Faraday; son exactitude a été successivement vérifiée par M. Matteucci, et par M. Ed. Becquerel.

Le passage des courants à travers les électrolytes s'accompagne souvent de phénomènes complétement étrangers à son action propre; la distinction des produits de l'électrolyse et de ceux qui proviennent de ces causes perturbatrices est, dans beaucoup de cas, assez difficile à établir pour que des physiciens d'un grand mérite aient conçu des doutes sérieux sur l'exactitude des lois précédentes. Les travaux publiés dans ces derniers temps par M. Buff (1), M. Soret (2), M. Despretz (3) n'ont pas peu contribué à réduire à leur juste valeur les objections soulevées contre la grande découverte de M. Faraday, et à démontrer que, sauf certaines restrictions indiquées par M. Faraday lui-même et qui dépendent de la *conductibilité physique* des électrolytes, les lois de l'action *définie* du courant voltaïque doivent prendre place parmi les faits les plus positifs de la physique.

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1853, t. XXII, p. 344; 1855, t. XXIX, p. 118.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, 1854, t. XLII, p. 257.— *Bibliothèque universelle de Genève*, 1855, t. XXIX, p. 265.

(3) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1851, t. XXXIII, p. 183, et 1854, t. XXXVIII, p. 897.

Nous avons déjà eu occasion de dire comment, aux résultats directs de l'électrolyse, viennent souvent se mêler les effets d'actions secondaires qui se passent entre les éléments mis en liberté dans le sein des liquides électrolysés. Les expériences de M. D'Almeida (page 493) nous ont montré que, lorsque par le fait même du passage du courant à travers une dissolution saline *neutre*, le liquide est devenu acide ou alcalin autour des électrodes, l'action chimique du courant, au lieu de se porter tout entière sur le composé salin, se partage entre l'eau et le sel. Quand on veut étudier l'action directe d'un courant sur un sel métallique, il y a donc nécessité de maintenir la *neutralité* de la dissolution pendant toute la durée de l'opération, afin de se mettre à l'abri de *l'action secondaire* que l'hydrogène de l'eau décomposée ne manquerait pas d'exercer sur le sel. Nous ne ferons que mentionner ces diverses causes perturbatrices pour nous occuper plus spécialement d'une question qui, dans ces derniers temps, a fortement attiré l'attention des physiciens, nous voulons parler de la *conductibilité physique des liquides*.

Conductibilité physique des liquides. — Jusqu'ici nous avons considéré le courant dirigé à travers un liquide composé comme employé tout entier à opérer la séparation de ses éléments constituants ; mais ne serait-il pas possible qu'une portion du courant, variable avec la nature du liquide, traversât l'électrolyte sans opérer de décomposition sur son trajet? En d'autres termes, en même temps qu'ils jouissent de la *conductibilité électrolytique*, les liquides composés n'ont-ils pas aussi un

certain degré de *conductibilité physique* comparable à celle des métaux? La solution de cette question est de la plus haute importance. En effet, si les liquides composés possèdent ces deux espèces de conductibilité, évidemment une partie seulement du courant transmis est *électrolytiquement efficace*, le reste passe sans produire d'effet chimique. Nous sommes donc, alors, obligés d'admettre que, si les résultats obtenus par les divers observateurs ne s'écartent pas sensiblement des indications des lois de l'action chimique *définie*, cela tient uniquement à ce que la portion du courant propagée par *conductibilité physique* est très faible par rapport à celle qui passe par *voie électrolytique*.

M. Faraday a toujours admis la *conductibilité physique* des liquides; après avoir montré (1) que les courants peuvent toujours être suffisamment affaiblis pour traverser l'eau *sans la décomposer*, il ajoute (2) : « Il est tout à » fait évident que, comme *l'eau et les autres électrolytes* » peuvent conduire l'électricité *sans être décomposés* » lorsque l'électricité est d'une intensité assez faible, on » ne peut pas affirmer, comme *absolument vrai dans tous* » *les cas*, que, toutes les fois que l'électricité passe à tra- » vers un électrolyte, elle produit *un effet défini de décom-* » *position*. » Et si les lois de l'action électrolytique définie ont concordé sans écart sensible avec les résultats de ses expériences, il n'hésite pas à affirmer que cela tient uniquement à ce que la quantité d'électricité *physiquement*

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 298, § 985.
(2) *Loc. cit.*, p. 314, § 1032.

transmise est très faible en comparaison de celle qui passe *électrolytiquement*.

Les expériences de M. De la Rive, faites avec des courants magnéto-électriques, montrent (1) qu'il suffit d'élargir la surface des électrodes pour affaiblir considérablement, ou même rendre insensibles les effets de décomposition. Lorsque les électrodes étaient des *fils de platine*, la décomposition était abondante et rapide; quand, au contraire, on employait de larges lames de platine pour électrodes, on n'observait plus trace de décomposition, bien que le courant fût assez intense pour maintenir à + 98° la température d'une hélice métallique placée dans le circuit. En même temps, M. Matteucci faisait, avec des courants voltaïques, des observations du même genre (2). Nous ne rapporterons qu'une de ses expériences; elle est remarquable par la netteté du résultat, et la sensibilité du réactif employé. Dans deux vases parfaitement identiques, il plaça une dissolution aqueuse d'iodure de potassium à laquelle il avait ajouté une solution d'amidon; ces deux vases furent mis en communication entre eux et avec les pôles d'une pile voltaïque. Dans l'un des vases, le courant était transmis par des électrodes de platine de *très petite surface*, et dans l'autre par de *larges* plaques de même métal. Dans le premier vase, l'iode fut mis en liberté, et l'amidon bleuit autour de l'électrode positive quelques secondes après que le circuit fut fermé; dans le vase à *larges* électrodes, on ne put saisir aucune

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1837, t. IV, p. 835.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1837, t. LXVI, p. 225.

trace de décomposition, même après avoir prolongé pendant dix heures le passage du courant. M. Matteucci obtint des résultats semblables en opérant sur l'eau acidulée, et sur une dissolution de sulfate de cuivre. En supposant même que quelques traces de décomposition aient échappé à des observateurs aussi distingués, il n'en est pas moins incontestable que le *simple agrandissement* de la surface des électrodes suffit pour *affaiblir considérablement* l'intensité de l'action chimique du courant. Ainsi que le fait très bien remarquer M. Matteucci, pour expliquer un semblable résultat, il est nécessaire d'admettre que, indépendamment de la *conductibilité électrolytique*, les liquides possèdent une *conductibilité physique propre* analogue à celle des métaux.

M. Foucault a aussi adopté la manière de voir de M. Faraday; les considérations sur lesquelles il s'appuie pour admettre l'existence de la *conductibilité physique* des liquides sont trop neuves et d'un ordre trop élevé pour que nous ne devions pas citer textuellement ce remarquable passage de son mémoire (1) :

« La nécessité d'admettre l'existence de cette propriété » apparaît d'une manière très pressante, lorsqu'il s'agit de » ramener aux principes de l'électro-chimie les réactions » qui s'opèrent entre liquides composés. En effet, si le » produit de leur combinaison directe conserve ce même » état physique, les électricités dégagées au premier » instant ne peuvent se neutraliser qu'en cheminant à tra-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1853, t. XXXVII, p. 580.

» vers tous milieux liquides; il faut donc, ou que la » réaction s'arrête par l'influence contraire des tensions » électriques, ou qu'un courant s'établisse sans entraîner » de décomposition; comme en réalité la réaction se pour- » suit et s'achève, on doit en conclure : 1° que les liquides » sont doués d'une conductibilité propre analogue à celle » des métaux; 2° que cette conductibilité est sans doute » très faible, car, en raison des épaisseurs infiniment pe- » tites où elle s'exerce, il suffit, pour lever toute difficulté, » que cette conductibilité ne soit pas rigoureusement » nulle. »

A la suite et à l'appui de ces considérations, M. Foucault rapporte une série d'expériences très probantes. Plus tard (1), il a repris cette question, et, pour répondre aux objections soulevées par M. Buff contre les conclusions de son premier mémoire, il a publié des observations nouvelles de nature à mettre l'existence de la *conductibilité physique des liquides* hors de toute contestation possible.

M. Masson (2) a publié sur ce sujet une observation intéressante. En faisant passer, *sans étincelle*, le courant induit de l'appareil de Ruhmkorff à travers de l'alcool absolu contenu dans un tube de verre, il a vu *le liquide s'échauffer, bouillir et distiller entièrement sans aucune trace de décomposition*. Il réussit également avec de l'alcool ordinaire.

Ajoutons enfin que, dans un dernier travail, M. Fara-

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1854, t. XXV, p. 180; 1854, t. XXVI, p. 126.

(2) *Ann de chim. et de phys.*, 3e série, 1855, t. XLV, p. 432.

day (1) a fait voir que les phénomènes d'induction électrostatique s'accordent avec ses propres expériences et avec celles de M. Foucault pour démontrer l'existence d'une *conductibilité physique* dans les liquides *électrolytiques*.

En face de tous ces faits, quelque imposante que soit l'opinion des savants qui se refusent encore à admettre l'existence de la *conductibilité physique* des liquides, nous n'hésitons pas à adopter la conclusion suivante de M. Foucault :

« On ne doit tenir pour vraie la loi de M. Faraday » sur l'équivalent électrique qu'à la condition de négliger » les écarts insensibles qui proviennent de la *conductibilité* » *propre des liquides*. »

Du mode suivant lequel s'opère la décomposition électrolytique. — Lorsqu'un liquide est soumis à l'action d'un courant électrique, c'est seulement autour des électrodes, c'est-à-dire aux points par lesquels le courant pénètre et s'échappe, que les produits de la décomposition se montrent, et le liquide n'éprouve aucune modification *apparente* dans les points intermédiaires du trajet parcouru par l'électricité. On ne peut cependant pas dire que ces produits soient *réellement transportés à l'état de liberté* d'une électrode à l'autre à travers la masse liquide; car, quelle que soit la distance qui les sépare, jamais la présence de ces *produits libres* n'a pu être constatée ailleurs qu'autour des électrodes elles-mêmes. Pour expliquer ce phénomène de *transport apparent*, Grothus (2) a proposé

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1855, t. XXX, p. 153.
(2) *Ann. de chim.*, 1807, t. LXIII, p. 5.

une théorie qui est généralement adoptée par les physiciens.

Prenons, par exemple, l'eau pour électrolyte : le premier effet du courant est de *polariser* toutes les molécules du liquide comprises entre les deux électrodes, et de les orienter de telle façon que, dans chaque molécule (Fig. 265), l'oxygène soit tourné du côté de l'électrode

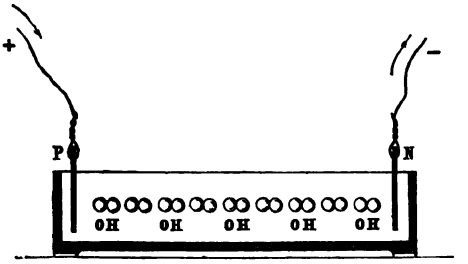


Fig. 265.

positive P, et l'hydrogène du côté de l'électrode négative N ; puis les molécules *polarisées* se déchargent l'une sur l'autre. Cet échange d'électricité entre molécules contiguës se fait par *arrachement* de leurs éléments constituants ; chaque molécule d'eau est électrolytiquement décomposée : l'oxygène et l'hydrogène de chaque molécule conservant leurs tensions électriques contraires, sont entraînés, le premier *en sens inverse*, le second *dans le sens* du courant lui-même. L'équivalent d'oxygène de la molécule d'eau extrême du côté de l'électrode positive, ne rencontrant aucun corps avec lequel il puisse se combiner, reste *libre* et se dégage ; il en est de même de l'équivalent d'hydro-

gène de la molécule d'eau extrême du côté de l'électrode négative. Les autres équivalents d'oxygène et d'hydrogène, poussés en sens inverse les uns des autres, se rencontrent, se recombinent, et reproduisent des molécules d'eau qui, à leur tour, sont polarisées, orientées et décomposées.

La décomposition électrolytique est donc un échange d'éléments constituants entre molécules composées contiguës. Dans tout le trajet du courant à travers le liquide, les produits ne se montrent jamais à l'état libre, parce qu'en un point quelconque de ce trajet les éléments nécessaires pour reproduire les molécules composées se trouvent en présence, et se combinent. Les éléments de la molécule composée ne sont donc jamais *réellement transportés* que d'une molécule à l'autre. Enfin les produits de la décomposition se montrent *libres* à la surface des électrodes, parce que, dans ces points seulement, chacun des éléments de la molécule composée se trouve *isolé* et hors de la présence de l'élément contraire qui serait nécessaire pour la reproduire.

Cette théorie s'applique directement à l'électrolyse de tous les composés métalliques binaires ; l'oxygène est remplacé par l'élément négatif (chlore, iode, brome, etc.), et le métal prend la place de l'hydrogène. Quand il s'agit de la dissolution d'un oxysel, l'élément négatif est représenté par l'acide et par l'oxygène de la base qui se montrent ensemble à la surface de l'électrode positive ; le métal se conduit toujours comme l'hydrogène ou élément positif, et se précipite sur l'électrode négative.

Comme, en général, les électrodes employées sont

des lames métalliques, quelques physiciens font jouer à ces électrodes le rôle de centres d'attraction capables de produire un mouvement des éléments de la particule composée dans des directions déterminées. M. Faraday (1) s'est élevé avec raison contre cette manière de comprendre les phénomènes. Il est facile en effet de disposer les expériences de manière que les produits de la décomposition viennent se déposer à une assez grande distance des électrodes métalliques. Déjà (p. 507) nous avons vu que, dans le cas de la décomposition du sulfate de soude par la décharge *obscure* d'une machine électrique, les surfaces de séparation de l'air et des bandes de papier mouillé doivent être assimilées à de véritables *électrodes*, puisque l'acide et la soude sont mis en liberté dans les points mêmes où l'électricité passe de l'air au liquide et du liquide à l'air. M. Faraday, reprenant une expérience ancienne de Davy, a montré (2) que le même résultat peut être obtenu avec de l'eau distillée.

Il prend un vase de verre V (Fig. 266), qu'il divise en deux cellules *c* et *b* au moyen d'une cloison incomplète formée avec une lame de mica *a*. Dans la cellule *b*, il place une large lame verticale de platine *d*, puis il verse dans ce vase une solution saturée de sulfate de magnésie dont le niveau s'élève au-dessus du bord inférieur de la lame de mica *a*. Il prend d'ailleurs beaucoup de précautions pour que, du côté de la cellule *c*, les parois du vase et de la

(1) *Experimental Researches*, t. I, p. 135 et suiv.
(2) *Experimental Researches*, t. I, p. 140.

lame *a* ne soient pas mouillées au-dessus du niveau du liquide. Cela fait, dans la cellule *c*, il dispose sur la surface de la dissolution un flotteur de liége imbibé d'eau distillée, et sur ce flotteur il verse lentement de l'eau distillée. A mesure que l'épaisseur de la couche d'eau distillée augmente, la dissolution saline est refoulée, son niveau

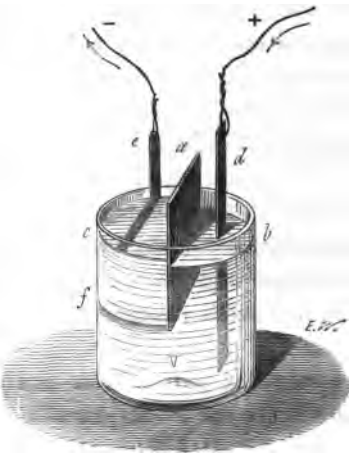


Fig. 266.

s'abaisse dans la cellule *c*, et s'élève dans la cellule *b*. Lorsque le niveau de cette dissolution est encore, dans la cellule *c*, au-dessus du bord inférieur de la lame de mica *a*, on arrête l'opération et l'on remplace le flotteur par une lame coudée de platine *e*, dont la partie horizontale est maintenue en contact avec la surface de l'eau distillée. De cette manière, toute la cellule *c* est remplie d'eau distillée jusqu'en *f*; le reste du vase contient du sulfate de magné-

sie. Les lames de platine *d*, *e*, étant mises en communication avec les pôles d'une pile, l'*électrode métallique négative e* est séparée de la solution saline par toute l'épaisseur de la colonne d'eau distillée contenue dans la cellule *c*. Au moment où le circuit est fermé, la décomposition commence : l'acide sulfurique se montre, comme à l'ordinaire, autour de l'*électrode positive métallique d*; mais la *magnésie* vient se déposer *en entier* sur la couche *f* de séparation de l'eau distillée et de la solution saline.

C'est donc la face inférieure de la colonne d'eau distillée, placée entre la lame métallique *e* et la solution saline, qui joue ici le rôle d'électrode négative; la magnésie est arrêtée en *f*, parce qu'elle est insoluble dans l'eau distillée; mais, si elle avait réellement été transportée en *f* par l'attraction de la lame métallique négative *e*, on ne voit pas pourquoi cette attraction ne l'aurait pas également entraînée à travers l'eau distillée.

Les liquides et les gaz peuvent donc servir d'électrodes tout comme les lames ou les fils métalliques. Les électrodes ne représentent en réalité que les surfaces par lesquelles le courant entre dans l'électrolyte, et en sort; la polarisation des molécules et la séparation de leurs éléments sont les effets directs du mode de propagation de l'électricité à travers les électrolytes. Les éléments des molécules électrolysées voyagent à travers le liquide par voie de décompositions et recompositions successives; mais il n'y a pas de véritable *transport* d'éléments que l'on puisse attribuer à une action attractive des lames métalliques en communication avec les pôles de la pile. Toute surface solide, liquide ou gazeuse pouvant servir à introduire le

courant et à lui donner issue peut, par cela même, servir d'électrode. Pour que les éléments des molécules électrolysées se montrent *à l'état de liberté* sur une section quelconque du trajet du courant, il suffit et il faut qu'ils puissent y parvenir par voie de décompositions et de recompositions successives, et qu'ils n'y rencontrent pas de corps capables de se combiner avec eux.

En combinant ce mode de décomposition électrolytique avec la loi de l'action *définie* du courant, il est facile de se rendre compte de ce qui se passe dans le cas où l'électricité traverse une série d'électrolytes en contact.

Séparons (Fig. 267) un vase de verre V en deux cellules

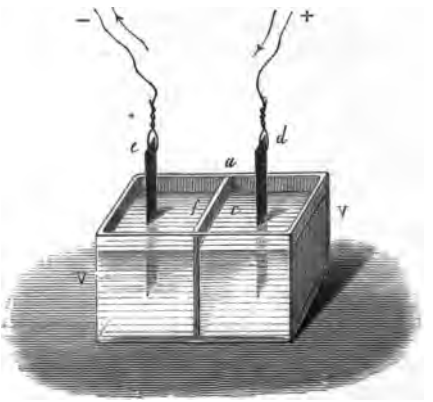


Fig. 267.

distinctes *f*, *c*, au moyen d'une mince cloison poreuse *a*; versons dans la cellule *f* une dissolution d'azotate de plomb, et dans la cellule *c* une dissolution de sulfate de

cuivre; enfin faisons communiquer l'électrode de platine *d* avec le pôle positif, et l'électrode de platine *e* avec le pôle négatif d'une pile. Au bout d'un certain temps, il y aura de l'acide sulfurique et de l'acide azotique libres autour de l'électrode *positive d*; il y aura, de plus, un dépôt de plomb et de cuivre sur l'électrode *négative e*. Cependant, au début de l'opération, il n'y avait ni trace d'acide azotique dans la cellule *c*, ni trace de cuivre dans la cellule *f*. Pour bien comprendre cette action, il faut se rappeler que la surface de séparation des deux électrolytes dans l'épaisseur de la cloison poreuse *a* est, à la fois, *une électrode négative* pour le sulfate de cuivre, et une *électrode positive* pour l'azotate de plomb. Cela posé, au moment où le circuit est fermé, d'une part *un* équivalent d'acide sulfurique et *un* équivalent d'oxygène se montrent sur l'électrode *d*, en même temps *un* équivalent de cuivre est mis en liberté dans la cloison *a*; d'autre part, dans cette même cloison *a*, apparaissent *un* équivalent d'acide azotique et *un* équivalent d'oxygène, tandis qu'*un* équivalent de plomb se précipite sur l'électrode *e*. A la surface de séparation des deux électrolytes, dans la cloison *a*, il y a donc en présence, et *à l'état libre*, tous les éléments d'*un* équivalent d'azotate de cuivre qui se forme et reste en dissolution dans le liquide. Mais ce nouveau sel, *azotate de cuivre*, produit secondaire de l'affinité des éléments mis en liberté par l'action directe du courant, est lui-même électrolytiquement décomposé, et, comme l'électrolyse s'opère partout et toujours en *proportions définies*, l'acide azotique et le cuivre cheminent par voie de décompositions et de recompositions successives, le premier avec

l'acide sulfurique vers la lame positive *d*, le second avec le plomb vers la lame négative *e*. Par conséquent, quand le courant aura marché assez longtemps, les deux acides existeront ensemble et *libres* autour de l'électrode positive, et les deux métaux seront précipités sur l'électrode négative.

Pour prouver que les phénomènes suivent cette marche, divisons (Fig. 268) un vase de verre V en trois cellules,

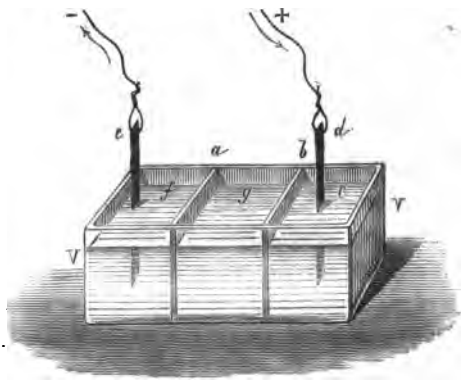


Fig. 268.

au moyen de deux minces cloisons poreuses *a*, *b*; versons de l'azotate de baryte dans la cellule *c* du côté de l'électrode positive *d*, du sulfate de cuivre dans la cellule *f* du côté de l'électrode négative *e*, de l'eau dans la cellule intermédiaire *g*, et fermons le circuit. Dans ce cas, l'acide azotique se montre *seul* autour de la lame positive *d*, et le cuivre se précipite *seul* sur la lame négative *e*. Les deux sels sont bien évidemment décomposés par le courant; cepen-

dant il n'y a ni acide sulfurique autour de l'électrode positive, ni baryte autour de l'électrode négative; mais l'eau de la cellule intermédiaire *g* est troublée par un dépôt de *sulfate de baryte insoluble*. L'acide sulfurique de la cellule *f* et la baryte de la cellule *c* ont donc cheminé, de molécule à molécule, le premier vers l'électrode positive, la seconde vers l'électrode négative. Ces deux corps ont pénétré ensemble dans la cellule intermédiaire *g* et se sont combinés; après leur combinaison, ils ont été arrêtés dans cette cellule, parce que le sulfate de baryte, à raison de son insolubilité, a échappé à l'action du courant.

Ainsi donc, que le courant traverse un seul liquide ou qu'il passe à travers plusieurs électrolytes en contact immédiat, le mode de propagation de la décomposition électrolytique est le même. Les molécules contiguës échangent leurs éléments en proportions définies, et ces éléments cheminent ainsi de proche en proche par voie de décompositions et recompositions successives. Ce mouvement continue tant que les corps provenant de la combinaison des éléments mis en liberté sont eux-mêmes des électrolytes, et jusqu'à ce que ces éléments arrivent à des surfaces où, ne trouvant plus d'éléments contraires auxquels ils puissent s'unir, ils se manifestent à l'état de liberté et avec toutes leurs propriétés.

Ainsi s'expliquent les résultats des expériences dans lesquelles Davy (1) montrait des acides et des alcalis qui traversaient des teintures de tournesol et de curcuma sans altérer leurs couleurs. Si les couleurs végétales, dans ces

(1) *Ann. de chim.*, 1807, t. LXIII, p. 205.

cas-là, restent intactes en présence des acides et des alcalis, cela ne tient pas à ce que les propriétés caractéristiques de ces corps sont *masquées* par le courant, l'expérience du sulfate de baryte dépose contre cette interprétation. Les teintures végétales contiennent des sels qui, eux aussi, sont décomposés en proportions définies, et échangent leurs éléments avec les dissolutions salines voisines. Dans ces teintures placées sur le trajet du courant, il n'y a donc d'acide et d'alcali *libres* qu'autour des électrodes, c'est-à-dire là où leurs couleurs sont altérées comme à l'ordinaire ; partout ailleurs des sels sont reformés au moment même où d'autres sont décomposés, et il n'est pas extraordinaire que le tournesol et le curcuma n'accusent pas la présence d'acides et d'alcalis qui n'existent pas à *l'état de liberté*.

ARTICLE V.

DES ÉLECTROMOTEURS HYDRO-ÉLECTRIQUES ET DE LA PILE SÈCHE.

Nous savons que l'action chimique est une source puissante de force électromotrice ; d'autre part, nous avons vu que le courant électrique décompose les liquides qu'il traverse, et que, dans l'électrolyse, les éléments mis en liberté prennent des tensions opposées. Ces notions nous permettent de mieux préciser le mode de génération du courant dans les appareils dont la force électromotrice est due à une action chimique.

§ Ier. — Couple voltaïque.

Dans le couple voltaïque (Fig. 269), la lame de zinc Z représente le métal *positif*, la lame de cuivre C joue le rôle de métal *négatif*, et le liquide actif est de l'acide sul-

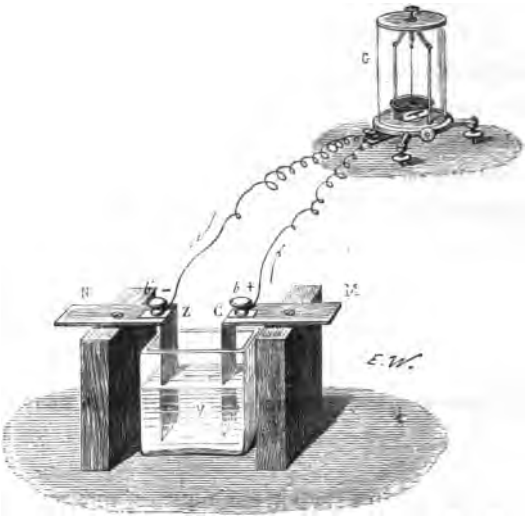


Fig. 269.

furique étendu d'eau. L'eau est décomposée, son oxygène attaque la lame de zinc, l'oxyde ainsi formé se combine avec l'acide sulfurique, l'hydrogène reste libre et se dégage à la surface de la lame de cuivre. Le résultat de ces actions chimiques est la production d'un courant dirigé

du zinc au cuivre dans le liquide, et du cuivre au zinc dans l'arc interpolaire.

A la surface de contact du liquide et de la lame de zinc il s'établit, au premier instant, une lutte d'affinités chimiques : d'une part, l'affinité de l'hydrogène pour l'oxygène s'oppose à la décomposition de l'eau ; d'autre part, l'affinité du zinc pour l'oxygène et l'affinité de l'acide sulfurique pour l'oxyde de zinc agissent ensemble pour mettre l'oxygène en liberté, et l'engager dans une nouvelle combinaison. Dans ce conflit, les molécules d'eau se polarisent, l'affinité de l'hydrogène est vaincue, l'eau est décomposée, le sulfate de zinc se forme. L'acide et le zinc prennent des tensions qui se neutralisent à travers l'arc interpolaire, donnent naissance à un courant dirigé, dans le liquide, du zinc au cuivre. Ce courant du premier instant traverse le liquide *électrolytiquement;* sous cette influence et conformément aux lois de la décomposition électrolytique, de nouvelles doses d'oxygène et d'hydrogène sont mises en liberté à la surface du zinc et à la surface du cuivre, l'action chimique continue et avec elle la circulation de l'électricité. Nous voyons ainsi comment le courant prend naissance, et s'entretient ; il nous reste à préciser les influences qui déterminent le *sens* de ce courant.

Au moment où il se sépare de l'hydrogène, l'oxygène prend une tension *négative ;* il y a donc tendance à la production d'un courant dirigé du liquide qui garde l'hydrogène *positif* au zinc vers lequel se porte l'oxygène. Nous savons, en outre, que l'oxydation du zinc et la formation du sulfate de zinc sont deux actions chimiques

concordantes qui produisent, l'une et l'autre, un courant dirigé du métal attaqué au liquide qui cède l'oxygène. La couche d'action chimique devient ainsi le siége de deux forces électromotrices de sens contraires dues, l'une à la décomposition de l'eau, l'autre à l'oxydation du zinc et à la dissolution de son oxyde dans le liquide acide. La force électromotrice du couple a donc la même intensité et le même sens que la *résultante* ou la *différence* de ces deux forces électromotrices partielles et opposées. Le courant produit marche, dans le liquide, du zinc au cuivre, parce que la force électromotrice née sous la double influence de l'oxydation du zinc et de la dissolution de l'oxyde de zinc dans l'acide sulfurique l'emporte sur la force électromotrice opposée due à la décomposition de l'eau.

Il est maintenant facile de comprendre pourquoi, en ajoutant de l'acide azotique à l'acide sulfurique étendu du couple voltaïque, on augmente l'intensité du courant produit. Dans ce dernier cas, l'eau est aussi décomposée et l'oxyde de zinc se forme aux dépens de son oxygène; mais l'hydrogène mis en liberté réagit sur l'acide azotique et le ramène à un moindre degré d'oxydation pour refaire de l'eau. En définitive, les phénomènes électriques qui accompagnent la recomposition de l'eau compensent exactement ceux de sa décomposition, et tout se passe comme si l'oxygène était directement cédé au zinc par l'acide azotique. Mais l'acide azotique abandonne son oxygène plus facilement que l'eau, et la tension *négative* de l'oxygène est moins forte quand il est fourni par l'acide azotique que quand il se sépare de l'eau. Ici encore

la force électromotrice du couple n'est donc que la résultante des deux forces électromotrices de sens inverses provenant, l'une de l'oxydation du zinc et de la dissolution de l'oxyde de zinc dans l'acide sulfurique, l'autre de la décomposition du liquide actif. Cependant cette résultante est plus considérable que dans le cas où le liquide actif ne contient que de l'acide sulfurique, parce que la force électromotrice de sens opposé à celle qui provient de la dissolution du zinc a moins d'intensité quand la décomposition porte sur l'acide azotique que quand elle porte sur l'eau.

L'expérience démontre que le courant a plus d'intensité lorsque, au lieu de placer simplement la lame de cuivre dans le liquide en face de la lame de zinc, on recourbe la première sur elle-même de manière à envelopper la seconde. Cette disposition, adoptée dans la construction du couple de Wollaston (p. 301, fig. 149 et 150), permet de recueillir directement sur le cuivre l'électricité développée par l'action de l'acide sur les deux faces du zinc; c'est, en réalité, un moyen de diminuer les résistances que le courant doit surmonter pour circuler, dans le couple, du métal positif au métal négatif. Or, nous verrons plus tard que toutes les circonstances qui affaiblissent les résistances du circuit augmentent, par cela même, l'intensité du courant. Telle est la véritable raison de la supériorité du couple de Wollaston sur le couple ordinaire, zinc et cuivre, de la figure 269. Quant à la force électromotrice qui ne dépend que de l'action chimique, elle est évidemment la même dans ces deux variétés du couple voltaïque.

Dans le couple voltaïque composé de cuivre, de *zinc du commerce* et d'acide sulfurique étendu, le courant n'a pas toute l'intensité qu'il devrait avoir, et de plus il s'affaiblit très rapidement.

En premier lieu, l'hydrogène de l'eau décomposée, au lieu de se porter tout entier sur la lame de cuivre, se dégage en partie à la surface de la lame de zinc. Ce phénomène tient à l'*impureté* du zinc employé dans la construction des couples voltaïques. Dans le zinc du commerce, en effet, on retrouve toujours du fer et du cadmium; ces métaux, tant que dure l'action chimique, jouent par rapport au zinc le rôle d'éléments *négatifs*, et c'est à la surface de ces particules métalliques étrangères que se dégage une partie de l'hydrogène mis à nu. Il résulte de là qu'indépendamment du courant dirigé du zinc au cuivre à travers le liquide, il s'établit une circulation d'électricité du zinc à chacune de ces particules étrangères à travers le liquide, et de ces particules au zinc à travers la lame positive. Tous ces courants partiels et locaux absorbent une portion plus ou moins considérable de l'électricité dynamique due à la dissolution du zinc; ils diminuent d'autant l'intensité du courant général poussé à travers le circuit interpolaire, et seul capable de produire des effets extérieurs.

En second lieu, une portion de l'hydrogène mis en liberté au pôle positif du couple, au lieu de se dégager, reste adhérente à la surface de la lame de cuivre. Cette couche gazeuse oppose au passage de l'électricité une résistance qui diminue aussi l'intensité du courant. En outre, l'hydrogène retenu par adhérence à la surface du

cuivre tend, de son côté, à se combiner avec l'oxygène cédé par l'eau décomposée, et à produire un courant *secondaire* directement opposé à celui que fournit l'oxydation du zinc. Cette *polarisation* de la lame de cuivre explique l'affaiblissement si considérable et si rapide qu'éprouve le courant du couple voltaïque fermé.

D'après ce que nous venons de dire, si l'on pouvait faire disparaître les courants partiels qui s'établissent à travers la lame de zinc *impur du commerce* employée comme métal positif, on rejetterait toute l'électricité produite dans le circuit interpolaire, et l'on augmenterait nécessairement l'intensité du courant fourni par le couple voltaïque. Ce résultat est facilement obtenu en remplaçant le zinc *ordinaire* par du zinc *amalgamé*.

Zinc pur, zinc amalgamé. — Lorsqu'une lame de zinc du *commerce* est plongée dans de l'acide sulfurique étendu, l'action est très vive; la dissolution du métal est très rapide, et le dégagement d'hydrogène s'opère avec effervescence. M. De la Rive découvrit, en 1830 (1), que le zinc *pur* placé dans les mêmes circonstances est à peine attaqué, et que les bulles d'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau se succèdent avec une extrême lenteur. Étudiant de plus près ce phénomène, cet habile physicien montra que si, pendant que le zinc *pur* Z est plongé dans le liquide acide, on vient à le toucher (Fig. 270) avec un fil de platine P immergé dans le même liquide par une de ses extrémités, l'action de l'acide sur le zinc devient immédiatement très intense; le métal est très rapidement

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1830, t. XLIII, p. 391.

dissous, et l'hydrogène se dégage *tout entier* autour du fil de platine. D'ailleurs, le fil de platine peut être remplacé, dans cette expérience, par un morceau de cuivre, de plomb, d'étain, de fer, ou même par une substance non

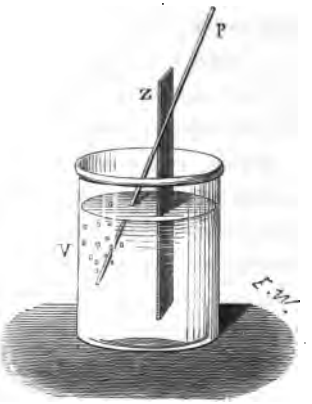


Fig. 270.

métallique, mais *conductrice*, comme le charbon, par exemple, et les résultats sont les mêmes. De ses recherches, M. De la Rive conclut que les véritables causes des différences observées entre le zinc *pur* et le zinc *impur du commerce* sont l'homogénéité du premier métal et l'hétérogénéité du second.

En effet, quand une lame de zinc *impur du commerce* plonge dans de l'acide sulfurique étendu, chaque particule de substance hétérogène joue, par rapport au zinc lui-même, le rôle de métal négatif, et la lame est traversée par une foule de courants partiels. Par conséquent, l'hydro-

gène devient libre à la surface de ces particules hétérogènes, le zinc reste à nu exposé à l'action de l'acide sulfurique et sa dissolution marche très rapidement.

Avec le zinc *pur*, au contraire, les éléments d'un couple manquent; l'hydrogène de l'eau décomposée dans le premier moment se dégage sur toute la surface de la lame, reste en partie adhérent au métal, et le protége contre l'action ultérieure de l'acide; mais, si l'on plonge dans le liquide un fil de platine qui touche la lame de zinc en un point quelconque, le couple est constitué, l'électricité circule, l'hydrogène se dégage tout entier autour du platine, et le zinc, n'étant plus recouvert d'une couche gazeuse protectrice, est fortement attaqué par l'acide.

Dans un couple voltaïque dont le zinc *pur* est le métal positif, il n'y a pas de courant local, et l'électricité produite passe *tout entière* dans le circuit interpolaire. Le courant d'un couple ainsi constitué doit nécessairement être plus intense que le courant d'un couple semblable dont le métal positif serait du zinc *impur du commerce*. Enfin, dans une combinaison voltaïque composée d'une lame de zinc *pur* et d'une lame de zinc du *commerce* plongées dans de l'acide sulfurique étendu, le zinc *pur* doit jouer le rôle de métal *positif* par rapport au zinc du *commerce*. Toutes ces prévisions de la théorie ont été expérimentalement vérifiées par M. De la Rive dans le mémoire précédemment cité.

Le zinc du commerce *amalgamé* jouit de toutes les propriétés du zinc *pur*, et se conduit comme lui dans le couple voltaïque. Ce résultat est probablement dû à ce

que la couche d'amalgame recouvre uniformément la lame métallique, et constitue toute sa surface dans un état d'homogénéité qui ne permet à aucun point de cette surface de jouer le rôle d'élément *négatif* par rapport aux points voisins. Quoi qu'il en soit de cette explication, l'expérience démontre que, dans une combinaison voltaïque dont le *zinc amalgamé* forme le métal *positif*, *tout* l'hydrogène se montre à la surface du métal *négatif*, il n'y a plus de courant local dans la lame de zinc, et toute l'électricité produite passe dans le circuit interpolaire.

L'emploi du *zinc amalgamé* comme métal *positif* est donc un moyen facile d'utiliser, sous forme de courant extérieur, toute l'électricité développée par l'action chimique, et de donner au couple voltaïque son *maximum* de puissance.

§ II. — Couples à courant constant.

Quel que soit le métal employé comme élément *positif*, le courant du couple voltaïque s'affaiblit très rapidement. Nous avons vu précédemment que cette diminution d'intensité est le résultat de la *polarisation* du métal *négatif* due elle-même à la présence d'une couche d'hydrogène gazeux adhérent à sa surface. Le moyen de rendre *constante* l'intensité du courant serait d'empêcher cette *polarisation* des lames métalliques de se produire, en ne laissant aucun dépôt de matière hétérogène se former à leur surface. Déjà, en 1829, M. Becquerel (1) s'était occupé

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, 1829, t. XLI, p. 5.

de cette question importante, et avait employé des électromoteurs dont le courant avait une intensité faible, mais sensiblement constante, lorsque M. Daniell (1) fit une très heureuse application des principes de l'électrochimie, et dota la science d'un couple à *courant constant* plus puissant que le couple de Wollaston. Plus tard, MM. Grove et Bunsen firent aussi connaître des électromoteurs à deux liquides fondés sur les mêmes principes; ces deux dernières *combinaisons* fournissent des courants plus intenses, mais *moins constants* que celui du couple de Daniell. Nous devons ici donner quelques détails sur la théorie de ces appareils, et sur les dispositions adoptées dans leur construction.

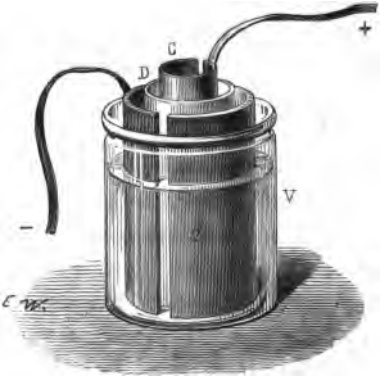


Fig. 271.

Couple de Daniell. — Dans un vase de faïence ou de verre V (Fig. 271), on place un cylindre de *terre poreuse* D

(1) *Bibliothèque universelle de Genève*, 1836, t. II, p. 167.

fermé par son extrémité inférieure. La capacité du vase extérieur est ainsi partagée en deux cellules qui ne peuvent communiquer qu'à travers les parois poreuses et perméables du cylindre D. On verse dans la cellule extérieure de l'acide sulfurique étendu d'eau, et l'on plonge dans ce liquide un cylindre creux de zinc *amalgamé* Z. On remplit la cellule intérieure d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre, après y avoir introduit un cylindre de cuivre C.

Tant que les cylindres de zinc *amalgamé* et de cuivre ne sont pas en communication, il n'y a pas d'action chimique sensible ; mais du moment que le circuit est fermé, le zinc est fortement attaqué, *sans dégagement appréciable d'hydrogène*. En même temps, un courant dirigé du zinc au cuivre traverse les liquides et la cloison poreuse qui les sépare; le cylindre de zinc Z est donc le pôle *négatif*, et le cylindre de cuivre C le pôle *positif* du couple.

Comme dans le couple voltaïque ordinaire, les molécules d'eau sont polarisées, et l'eau elle-même est décomposée sous la double influence de l'affinité du zinc pour l'oxygène et de l'affinité de l'acide sulfurique pour l'oxyde de zinc. L'oxygène mis à nu dans la cellule extérieure attaque le zinc dont l'oxyde se combine avec l'acide sulfurique, et le cylindre de zinc Z prend une tension *négative*. L'hydrogène devient libre dans la cellule intérieure, attaque le sulfate de cuivre, réduit son oxyde, et précipite du cuivre *à l'état métallique* sur le cylindre de cuivre C qui prend une tension *positive*. Toutes ces réactions chimiques s'opèrent suivant les lois de l'électrolyse; pour *chaque* équivalent d'eau décomposée, il y a *un* équivalent

d'oxygène mis à nu, *un* équivalent de zinc oxydé et *un* équivalent de sulfate de zinc produit dans la cellule extérieure: en même temps, dans la cellule intérieure, *un* équivalent d'hydrogène devient libre, décompose *un* équivalent de sulfate de cuivre, reproduit *un* équivalent d'eau et précipite *un* équivalent de cuivre à l'état métallique sur le cylindre C. En résumé, puisque l'eau décomposée dans une des cellules est reproduite dans l'autre et en quantité égale, toute l'action chimique se réduit à la formation d'*un* équivalent de sulfate de zinc dans la cellule extérieure et à la décomposition d'*un* équivalent de sulfate de cuivre dans la cellule intérieure, ou, en d'autres termes, à la *substitution* d'*un* équivalent de zinc à *un* équivalent de cuivre dans la dissolution saline. Le courant du couple de Daniell est le résultat de cette *substitution*.

Mais, si, dans la cellule extérieure, la formation du sulfate de zinc donne naissance à une force électromotrice dirigée du cylindre de zinc Z au liquide acide qui l'entoure, nous savons aussi que, dans la cellule intérieure, la réduction du sulfate de cuivre produit une autre force électromotrice dirigée du cylindre de cuivre C à la solution saline qui le baigne. La substitution de l'équivalent de zinc à l'équivalent de cuivre produit donc deux forces électromotrices de sens opposés. Par conséquent, dans la combinaison de Daniell comme dans la combinaison voltaïque, la force électromotrice du couple est une *résultante :* c'est la *différence* de deux forces électromotrices inégales et opposées nées sous l'influence des réactions chimiques qui se passent entre les liquides et les éléments métalliques. Dans le couple de Daniell, l'im-

pulsion finale agit du zinc Z au cuivre C, et le courant traverse les liquides dans le même sens, parce que la force électromotrice produite par la dissolution du zinc dans l'acide sulfurique l'emporte sur celle qui accompagne la réduction du sulfate de cuivre. D'ailleurs, le métal positif étant du zinc amalgamé, il ne peut pas s'établir de circulation locale dans les plaques métalliques, et toute l'électricité développée par les réactions chimiques passe par les conducteurs interpolaires.

Dans la cellule extérieure, l'oxyde de zinc est dissous par l'acide sulfurique à mesure qu'il se forme ; la surface du métal positif Z reste donc toujours parfaitement nette et exposée à l'action du liquide acide qui la baigne. D'autre part, le métal négatif C est du cuivre et ne saurait être polarisé, car il ne se dépose à sa surface que le *cuivre* cédé par la solution saline de la cellule intérieure. La combinaison de Daniell satisfait donc à toutes les conditions nécessaires pour que l'intensité de la force électromotrice et du courant reste *constante*.

Cependant, par le fait même des actions chimiques génératrices du courant, d'une part il s'accumule du sulfate de zinc dans la cellule extérieure autour du métal positif; d'autre part, la dissolution du sulfate de cuivre s'affaiblit dans la cellule intérieure. Cette altération graduelle des liquides tend à rendre les réactions chimiques moins vives, et ne manquerait pas d'affaiblir, à la longue, l'intensité du courant. Aussi, lorsque le couple de Daniell doit rester longtemps en action, il est nécessaire d'adopter des dispositions qui permettent de conserver aux liquides leur composition normale. Des cristaux de sulfate de

cuivre introduits dans la cellule intérieure, ou tenus simplement en contact avec le liquide qui la remplit suffisent pour que la dissolution saline reste saturée pendant toute la durée de l'opération. Du côté du métal positif, le sulfate de zinc, en raison de sa densité, gagne le fond du vase à mesure qu'il se forme; en faisant tomber de l'eau acidulée goutte à goutte dans la cellule intérieure et en y plaçant un siphon convenablement disposé, on peut donc chasser au dehors le sulfate de zinc et maintenir normale la composition du liquide acidulé. Avec ces précautions bien simples, les réactions chimiques conservent la même activité, la force électromotrice ne perd rien de son intensité, et le courant peut rester *constant* pendant plusieurs jours.

La pile de Daniell (**Fig. 272**) se compose d'une série de couples semblables au précédent. Ces éléments électro-

Fig. 272.

moteurs sont disposés comme à l'ordinaire; deux couples contigus communiquent par leurs métaux hétérogènes; une des extrémités de l'appareil se termine par une lame

de cuivre et l'autre par une lame de zinc. D'ailleurs, la dernière lame de cuivre C représente le pôle *positif*, et la dernière lame de zinc Z le pôle *négatif*.

Couple de Grove. — Les dispositions générales de ce couple (Fig. 273) sont les mêmes que celles du couple de Daniell. La capacité du vase V est partagée en deux cel-

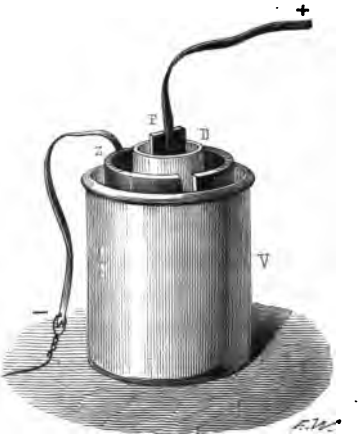


Fig. 273.

lules par un cylindre de terre poreuse D. Dans la cellule extérieure, on met de l'acide sulfurique étendu et un cylindre creux de zinc amalgamé Z. On verse de l'acide azotique du commerce dans la cellule intérieure, et l'on y plonge une lame de platine P qui joue le rôle de métal négatif. Dans ce couple, l'eau est décomposée; son oxygène est mis à nu dans la cellule extérieure, et attaque le zinc dont l'oxyde se combine avec l'acide sulfurique à mesure qu'il se forme. L'hydrogène rendu libre dans la

cellule intérieure enlève à l'acide azotique une partie de son oxygène, et le ramène à un moindre degré d'oxydation. Il ne se forme aucun dépôt qui puisse altérer les surfaces métalliques et entraîner, en les *polarisant*, un affaiblissement du courant. D'ailleurs, l'électricité marche du zinc Z au platine P, à travers les liquides et la cloison poreuse; le platine représente le pôle *positif*, et le zinc le pôle *négatif* du couple.

Si nous comparons le couple voltaïque au couple de Daniell et au couple de Grove, nous voyons que, dans chacune de ces trois combinaisons, les actions chimiques génératrices de l'électricité développent deux forces électromotrices : l'une que nous appellerons *positive*, parce qu'étant la plus forte elle commande le sens du courant du couple, l'autre qui agit en sens inverse, et, pour cela même, doit être appelée *négative*. En rapportant ces forces aux actions chimiques qui les produisent, nous les trouvons réparties ainsi qu'il suit :

	Force positive.	Force négative.
COUPLE VOLTAÏQUE.	Dissolution du zinc dans l'acide sulfurique...	Décomposition de l'eau
COUPLE DE DANIELL.	Dissolution du zinc dans l'acide sulfurique...	Réduction du sulfate de cuivre.
COUPLE DE GROVE..	Dissolution du zinc dans l'acide sulfurique...	Réduction de l'acide azotique.

La force électromotrice de chacun de ces couples est, en réalité, l'excès de la force *positive* sur la force *négative*. La force *positive* étant la même dans les trois combinaisons,

les intensités des courants qu'elles fournissent doivent varier en sens inverse des intensités des trois forces *négatives* correspondantes. Nous savons, d'autre part, que l'intensité d'une force électromotrice dépend de l'énergie des affinités chimiques mises en jeu pour lui donner naissance. Or, des trois décompositions qui produisent les forces *négatives*, la décomposition de l'eau est celle qui représente la plus forte action chimique, et la réduction du sulfate de cuivre s'opère elle-même plus difficilement que la réduction de l'acide azotique. La force *négative* du couple voltaïque l'emporte donc sur celle du couple de Daniell, et celle du couple de Daniell sur celle du couple de Grove; par conséquent, les forces *électromotrices résultantes* de ces trois combinaisons doivent, par rang d'intensité, se classer dans un ordre inverse. Ces considérations théoriques s'accordent très bien avec les résultats de l'expérience, et expliquent pourquoi, toutes choses égales d'ailleurs, le courant du couple de Daniell est plus intense que le courant du couple voltaïque, et plus faible que celui du couple de Grove.

Couple de Bunsen. — Le couple de Bunsen (Fig. 274) est un couple de Grove dans lequel le métal *négatif*, le *platine*, est remplacé par un cylindre ou une lame C de charbon de cornue qui jouit de la propriété de bien conduire l'électricité. L'extrémité du cylindre de charbon est coiffée d'une douille de cuivre K (Fig. 275) qui se met en équilibre de tension avec le charbon C, et qu'on protége contre l'action des liquides acides en la recouvrant d'une couche épaisse de mastic. Du reste, les liquides sont les mêmes que dans le couple de Grove : on verse de l'acide sulfu-

rique étendu dans la cellule extérieure, et de l'acide azotique du commerce dans la cellule intérieure. L'eau est décomposée, le zinc *amalgamé* Z se dissout dans l'acide

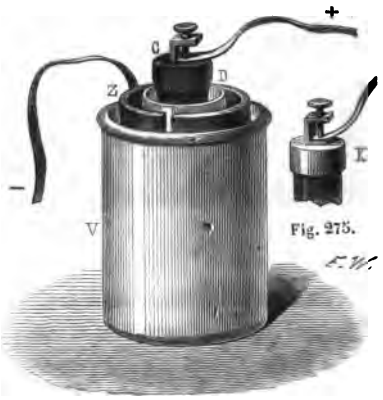


Fig. 274.

sulfurique, et l'hydrogène rendu libre dans la cellule intérieure ramène l'acide azotique à un moindre degré d'oxydation. Le courant marche du zinc Z au charbon C, à travers les liquides et la cloison poreuse. Le charbon C représente le pôle *positif*, et le cylindre de zinc Z le pôle *négatif* du couple.

Pour former une pile de Bunsen (Fig. 276), on dispose en série plusieurs éléments semblables au précédent. La communication s'établit entre deux couples contigus au moyen d'une lame métallique fixée au charbon de l'un et au zinc de l'autre. Dans la pile comme dans le couple isolé, le dernier cylindre de charbon C représente le pôle

positif, et le cylindre de zinc terminal Z le pôle *négatif* de l'appareil.

Fig. 276.

Le couple de Bunsen est d'une construction facile et peu coûteuse; il donne, comme celui de Grove, un courant plus intense que le couple de Daniell; aussi est-il généralement préféré à tous les autres pour les expériences qui réclament l'emploi de puissants électromoteurs. Cependant les piles de Bunsen laissent dégager des vapeurs nitreuses assez abondantes pour que, dans beaucoup de circonstances, on doive renoncer à s'en servir. D'ailleurs, dans les couples de Grove et de Bunsen, les liquides s'altèrent, et il n'est pas possible de maintenir leur composition normale, surtout dans la cellule intérieure remplie d'acide azotique. Il en résulte que, du moment que le circuit est fermé, l'intensité du courant prend d'abord une marche ascensionnelle, et puis ne tarde pas à s'affaiblir graduellement.

Le couple de Daniell est donc le seul qui fournisse un courant énergique et d'intensité constante; on doit le préférer à toutes les autres combinaisons électromotrices

dans les recherches qui ont pour but la détermination des lois de l'électricité dynamique.

§ III. — Couple gazeux de Grove.

M. Grove a démontré (1) que de l'oxygène et de l'hydrogène en contact avec des lames de platine, quoique séparés par une masse d'eau interposée, exercent l'un sur l'autre une action capable de produire un courant continu d'électricité. Profitant de cette réaction, il a construit des appareils électromoteurs assez puissants pour donner une étincelle, et décomposer l'eau. M. Grove a donné successivement plusieurs formes à son couple gazeux; nous nous contenterons de décrire ici celle qu'il a définitivement adoptée, et qui nous paraît la meilleure.

Les gaz sont renfermés dans des tubes de verre semblables au tube T (Fig. 277). Vers la partie inférieure, ce tube est muni d'un bourrelet de verre D usé extérieurement à l'émeri, et faisant office de bouchon. On introduit dans le tube une lame de platine platiné un peu moins longue que lui et terminée, à sa partie supérieure, par un gros fil de platine. Ce fil traverse le bout fermé du tube dans lequel il est scellé à la lampe, et se termine au dehors par un godet métallique E qu'on remplit de mercure.

Soit V (Fig. 278) un flacon de verre à trois tubulures. Ce flacon étant rempli d'eau aiguisée avec de l'acide sul-

(1) *Archives de l'électricité*, 1843, t. III, p. 489.

furique, on fixe dans ses deux tubulures latérales deux tubes O, H, pleins du même liquide; on fait passer de l'oxygène dans le tube O et de l'hydrogène dans le tube H

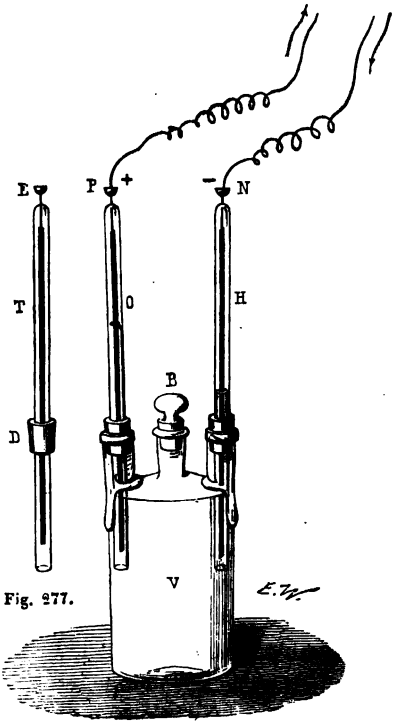


Fig. 277.

Fig. 278.

en proportions convenables pour que chaque lame de platine reste plongée dans l'eau acidulée par sa partie inférieure; puis on ferme hermétiquement la tubulure médiane avec un bouchon de verre B.

L'appareil ainsi préparé est un véritable couple dans lequel le pôle *positif* est représenté par le godet P du tube à oxygène, et le pôle *négatif* par le godet N du tube à hydrogène. Quand le circuit est fermé avec le fil d'un galvanomètre, il s'établit un courant qui traverse l'arc interpolaire de P en N. D'après les observations de M. Grove, ce courant est produit par les réactions chimiques qui se passent aux points de contact des gaz, des liquides et des lames de platine.

Sous l'influence des masses gazeuses et des lames de platine, les molécules d'eau sont polarisées. Dans chacune d'elles, l'oxygène est tourné vers la lame de platine du tube à hydrogène H, et l'hydrogène vers la lame du tube à oxygène O. L'eau est décomposée, son oxygène se dégage dans le tube H, et son hydrogène dans le tube O. Mais, dans le tube H, l'oxygène à l'état naissant rencontre, à la surface du platine, de l'hydrogène avec lequel il se combine; de même l'hydrogène à l'état naissant se combine avec l'oxygène adhérent à la surface du platine du tube O. Pour *chaque* équivalent d'eau décomposée dans le vase V, il se reforme donc *deux* équivalents d'eau dans l'appareil, *un* dans le tube H et l'*autre* dans le tube O; le résultat est donc le même que si l'hydrogène du tube H se combinait directement avec l'oxygène du tube O. Or, des principes exposés page 393 il résulte que, dans toute combinaison de ce genre, l'hydrogène joue le rôle d'un métal *positif*, et qu'il se développe une force électromotrice dont l'action est dirigée de l'hydrogène brûlé à l'oxygène comburant. La théorie et l'observation s'accordent donc pour démontrer que l'hydrogène du tube H est l'élé-

ment *positif*, et l'oxygène du tube O l'élément négatif de ce couple gazeux dont le courant marche de H en O à travers le liquide, et de O en H à travers l'arc interpolaire.

Lorsque le circuit reste fermé, on voit le volume des deux gaz diminuer graduellement dans les tubes O et H. La théorie indique que l'oxygène et l'hydrogène doivent être absorbés dans les rapports nécessaires pour faire de l'eau. Cependant, quand on mesure les gaz avec soin, on trouve *souvent* que, du côté du tube H, il disparaît un excès d'hydrogène; cette anomalie est plus apparente que réelle. M. Grove a démontré, en effet, qu'elle est due à la présence d'une proportion plus ou moins considérable d'oxygène retenu à l'état de dissolution dans le liquide du vase V, et à la combinaison de ce gaz libre avec l'hydrogène du tube H.

Pour construire une pile à gaz, on dispose (Fig. 279), entre deux colonnes isolantes et les uns à la suite des autres, un certain nombre de couples semblables au précédent. Des arcs métalliques *a*, *a*, *a*, *a*..., servent à faire communiquer le tube à hydrogène H d'un couple quelconque avec le tube à oxygène O du couple contigu. De cette manière, l'appareil se termine à une extrémité par un tube à oxygène dont le godet P représente le pôle *positif*, et à l'autre extrémité par un tube à hydrogène dont le godet N représente le pôle *négatif*.

Avec un seul couple à gaz bien construit, on peut opérer la décomposition de l'iodure de potassium. Le courant fourni par une pile de quatre et même de deux éléments est assez intense pour décomposer l'eau acidulée.

Après avoir fait passer, pendant un certain temps, le courant d'une pile à gaz à travers le liquide de l'appareil à décomposition de l'eau représenté page 473 (Fig. 253), comparons le volume des gaz recueillis dans les tubes du *voltamètre*

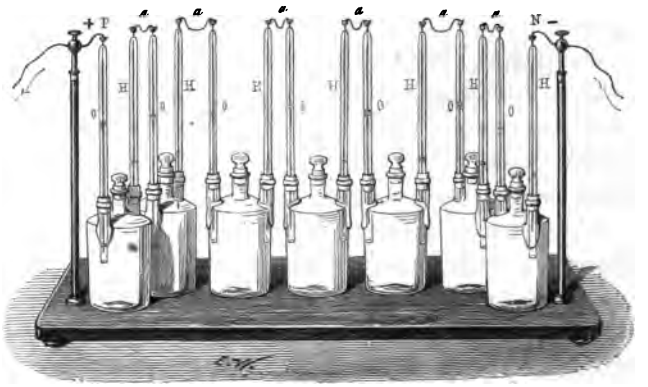


Fig. 279.

au volume des gaz absorbés dans chaque couple de l'électromoteur. A un moment quelconque de l'opération, nous trouverons qu'il a disparu, dans *chacun des couples* de la pile, une quantité d'oxygène et d'hydrogène *égale* à la quantité d'oxygène et d'hydrogène que le courant a mis en liberté dans le *voltamètre*. Ainsi, pour *chaque* équivalent d'eau décomposée par le courant, *un* équivalent d'eau a été produit dans *chacun des couples* de l'électromoteur. Cette expérience est une vérification fort élégante des lois de l'électrolyse; elle démontre que, dans un circuit voltaïque fermé, l'action chimique *génératrice du courant*, mesurée dans *chacun des couples de la pile*, est

équivalente à l'action chimique de *décomposition* que le courant peut développer dans un électrolyte quelconque placé sur son trajet, ou, en d'autres termes, que, dans une pile en action, le travail chimique *intérieur* accompli dans *chaque couple* est *équivalent* au travail chimique *extérieur* produit par le courant dans le circuit interpolaire.

M. Grove a essayé un grand nombre d'autres combinaisons gazeuses; les résultats de ses recherches sont parfaitement d'accord avec ce que nous avons dit du couple précédent, et avec ce que nous savons de la génération de la force électromotrice dans les appareils hydro-électriques.

L'oxygène en présence de l'azote ou du protoxyde d'azote, gaz sur lesquels il n'exerce aucune action chimique, ne produit pas la moindre trace de courant électrique; ces deux combinaisons sont complétement inactives. Les choses se passent de même quand on associe l'azote à l'hydrogène.

Associé au deutoxyde d'azote, au gaz oléfiant ou même à l'oxyde de carbone, l'oxygène forme des combinaisons électromotrices plus ou moins actives. Dans tous ces cas, d'ailleurs, l'oxygène, conformément aux indications des réactions chimiques accomplies, joue le rôle d'élément *négatif*.

En introduisant de l'oxygène dans un des tubes de l'appareil représenté figure 278, et de l'azote chargé de vapeurs de phosphore dans l'autre, on obtient un couple gazeux dans lequel la vapeur de phosphore représente l'élément *positif*. Quand on remplace les vapeurs de phosphore par des vapeurs de soufre, le résultat est le même.

On peut encore former des couples dans lesquels l'hy-

drogène joue le rôle d'élément *positif*, en associant ce gaz soit au deutoxyde, soit au protoxyde d'azote.

L'hydrogène associé au chlore forme un couple gazeux extrêmement puissant dont l'hydrogène est l'élément *positif*.

Le couple gazeux formé par le chlore et l'oxyde de carbone fournit aussi un courant très intense; dans ce cas, le chlore joue le rôle d'élément *négatif*.

M. Grove a démontré qu'il suffit, pour obtenir une combinaison électromotrice, de mettre en présence un gaz et un liquide capables d'agir chimiquement l'un sur l'autre. Ainsi :

Introduisons de l'oxygène dans un des tubes de l'appareil représenté figure 278, et remplissons l'autre tube de sulfate de protoxyde de fer; l'oxygène fait passer le protoxyde à un degré supérieur d'oxydation, et le liquide est traversé par un courant dirigé de la dissolution saline à l'oxygène gazeux.

Lorsqu'un des tubes étant rempli d'hydrogène, on remplit l'autre d'acide azotique, on obtient une combinaison électromotrice très puissante, dans laquelle l'acide azotique est réduit, et l'hydrogène gazeux joue le rôle d'élément *positif*.

§ IV. — Pile sèche.

Au commencement de ce siècle, plusieurs physiciens, admettant avec Volta que le simple contact de métaux hétérogènes est suffisant pour produire un développe-

ment d'électricité, cherchèrent à remplacer les liquides actifs de la pile par des corps solides *conducteurs et non électromoteurs*. Ces appareils, dont le mode de construction a souvent varié, sont connus sous la dénomination de piles sèches; les dispositions généralement adoptées aujourd'hui ont été proposées, en 1812, par Zamboni. Les matières employées sont: d'une part, le *papier ordinaire* comme corps *conducteur non électromoteur;* d'autre part, l'*étain* en lames très minces et la poudre de *peroxyde de manganèse* comme éléments métalliques *électromoteurs*.

On prend une feuille de papier *étamée* d'un côté seulement; sur la face *nue* de la feuille, on étend, avec un pinceau, une couche de poudre de peroxyde de manganèse délayée dans du lait. On a soin de fixer cet enduit avec un peu de colle d'amidon ou de gélatine. Quand l'enduit est sec, on découpe, au moyen d'un emporte-pièce, la feuille de papier ainsi préparée en petits disques de même diamètre; puis on place plusieurs centaines et même plusieurs milliers de ces disques les uns au-dessus des autres, en les disposant de telle manière que, dans une région quelconque de cette série, deux disques contigus se touchent par leur face *étamée* et par leur face enduite de *peroxyde de manganèse*. Cela fait, on arme les deux extrémités de l'appareil de plaques métalliques plus larges que les disques, et munies de petits appendices latéraux percés de trous. Enfin, pour mieux assurer les contacts, on comprime cette colonne dans le sens de son axe, et l'on assujettit les disques dans cette position au moyen de cordons de soie passés dans les trous des appendices des

armures terminales. Ces armures représentent les pôles de l'électromoteur.

Les piles sèches jouissent de propriétés particulières. Leurs tensions polaires sont beaucoup plus intenses que celles des piles ordinaires; les extrémités de l'appareil attirent les corps légers, fournissent des étincelles quand on en approche des corps conducteurs, et peuvent même servir à charger une bouteille de Leyde. La force électromotrice des piles sèches est donc considérable; mais, en raison du peu de conductibilité de l'appareil, l'électricité ne peut le traverser qu'avec beaucoup de difficulté, et les pertes éprouvées par les tensions polaires ne peuvent être réparées qu'avec beaucoup de lenteur. Cette circonstance sert à comprendre pourquoi les courants fournis par ces appareils ont très peu d'intensité, agissent très faiblement sur l'aiguille aimantée, et ne produisent que des effets chimiques à peine appréciables.

Lorsque l'atmosphère ambiante n'est pas chargée d'une trop grande quantité de vapeur d'eau, les tensions polaires de la pile sèche atteignent et conservent un degré très élevé; mais, quand l'air est très humide, les pertes éprouvées par les extrémités de l'appareil sont trop considérables pour être instantanément réparées, et les tensions polaires s'affaiblissent.

M. Delezenne (1) a publié un travail intéressant sur les piles sèches. Pour construire ses appareils, il emploie des rectangles de papier de 178 millimètres de longueur sur 158 millimètres de largeur; une des faces du papier est

(1) *Archives de l'électricité*, 1845, t. V, p. 67.

étamée, l'autre est recouverte, au pinceau, d'une couche de *poudre de peroxyde de manganèse* délayée dans de la gélatine fondue et étendue d'un peu d'eau. L'agrandissement de la surface des éléments de la pile augmente la conductibilité intérieure de l'appareil. La circulation de l'électricité et la réparation des pertes éprouvées par les tensions polaires sont, ainsi, rendues plus faciles et plus promptes. Avec une pile composée de *trois cents* de ces rectangles fortement comprimés, M. Delezenne a obtenu un courant assez intense pour dévier de 30 degrés l'aiguille du galvanomètre, et produire dans une dissolution aqueuse de sel marin une décomposition assez active.

Il résulte des observations de M. Delezenne que, dans ces appareils, la lame d'étain est attaquée par l'oxygène que lui cède le peroxyde de manganèse. La force électromotrice de la pile sèche est donc produite par une *réaction chimique;* son couple est représenté par la lame d'étain qui joue le rôle de métal *positif*, et par le peroxyde de manganèse qui se conduit comme un élément *négatif*. La position des pôles est d'accord avec cette manière de concevoir le développement de l'électricité dans une pile sèche. Le papier n'est qu'un corps *inerte et médiocre conducteur* destiné à établir une communication entre les éléments opposés des couples contigus.

Pour que les piles sèches conservent leur activité, il faut que les feuilles de papier placées entre les couples aient un certain degré d'humidité. L'exactitude de cette proposition est admise par tous les observateurs; les expériences de M. Delezenne en ont fourni une confirmation éclatante. Quand, par un moyen quelconque, l'appa-

reil a perdu toute son humidité, les actions chimiques intérieures s'affaiblissent considérablement, le papier qui sépare les couples se conduit lui-même comme un *corps isolant*, les tensions polaires ne peuvent plus être renouvelées et la pile perd toute sa force. Pour rendre à la pile toutes ses propriétés électromotrices, il suffit de l'exposer quelque temps à l'action d'une atmosphère humide.

Dans le but de les protéger contre l'action de l'air et de les empêcher de perdre trop vite l'humidité qui leur est nécessaire, on a l'habitude d'entourer ces appareils d'une enveloppe de gomme laque ou de soufre fondu. Les piles sèches ainsi préparées conservent leurs propriétés pendant plusieurs mois et même pendant plusieurs années, sans avoir besoin d'aucune réparation.

Électroscope de Bohnenberger. — Bohnenberger a eu l'idée très ingénieuse de profiter des propriétés de la pile sèche pour construire un électroscope d'une extrême sensibilité. Sur un socle de bois M (Fig. 280) on place, à 10 ou 12 centimètres l'une de l'autre, deux piles sèches P, P′ terminées par de petites colonnes métalliques surmontées, elles-mêmes, de petites sphères *a*, *b*. La sphère *a* est le pôle *positif* de la pile P, et la sphère *b* le pôle *négatif* de la pile P′. Par leurs parties inférieures, ces piles communiquent au moyen de la lame métallique *s;* de cette manière, l'ensemble des deux piles ne forme qu'un seul électromoteur, et les tensions des sphères *a*, *b* sont toujours *égales* et de signes contraires. On recouvre le tout d'une cloche de verre C. A travers la tubulure de la cloche passe une pince métallique D terminée en boule à sa partie supérieure, et portant, à son extrémité infé-

rieure, une feuille d'or *f* qui vient se placer exactement à égale distance des petites sphères *a*, *b*. Tant que la feuille d'or est à *l'état neutre*, elle est en équilibre entre deux attractions égales de signes contraires, et garde sa position

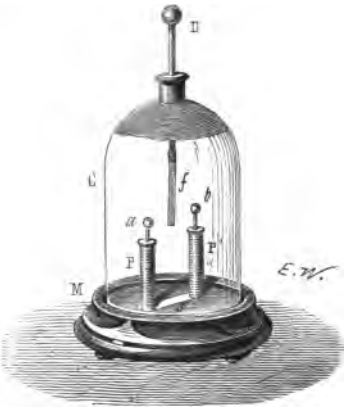


Fig. 280.

verticale; mais, du moment où elle est électrisée, quelque faible que soit la charge communiquée, la feuille d'or s'écarte de sa position verticale, et s'incline vers l'une ou l'autre des petites sphères *a*, *b*, suivant la nature du fluide qu'elle a reçu. La position des pôles étant connue à l'avance, le mouvement de la feuille d'or indique à la fois la présence de l'électricité libre à sa surface, et la nature de sa charge.

Pour que les indications de cet appareil soient bonnes, la feuille d'or *f* doit être maintenue très exactement à égale distance des sphères *a*, *b*. Si, par une cause quel-

conque, la feuille d'or *f* était écartée de cette position médiane, l'observateur serait induit en erreur et croirait à la présence d'une charge électrique qui, en réalité, pourrait ne pas exister. Dans ce cas, en effet, la feuille d'or, bien qu'elle fût à *l'état neutre*, serait nécessairement attirée par la sphère la plus rapprochée.

FIN DU TOME PREMIER.

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME PREMIER.

AVANT-PROPOS V

Plan de l'ouvrage 1

Première section. — ÉLECTRICITÉ STATIQUE 3

Phénomènes fondamentaux 3

Corps idio-électriques. — Corps anélectriques 3

Les métaux s'électrisent par le frottement 4

Corps conducteurs et corps isolants. — Réservoir commun. 5

Attractions et répulsions électriques 8

Existence de deux espèces d'électricité 9

Les deux corps frottés s'électrisent à la fois 11

Circonstances qui influent sur la nature de l'électricité dont se charge un corps frotté 12

Les gaz, les liquides et les métaux s'électrisent par le frottement 13

Hypothèses théoriques 14

Hypothèse d'un seul fluide 14

Hypothèse des deux fluides 15

CHAP. I. — Des forces électriques 17

ART I. — Lois des attractions et des répulsions électriques. 17

Balance électrique 18

Influence de la distance 21

Méthode des oscillations..... 23
Influence des charges électriques..... 24
Expression de l'action totale de deux charges électriques en présence..... 26
Pertes éprouvées par la charge électrique..... 28
Pertes par les supports..... 29
Pertes par l'air..... 30
Art. II.— Mode de distribution de l'électricité sur les corps conducteurs..... 32
L'électricité est localisée à la surface des corps..... 32
De la couche électrique. — De sa tension..... 37
Influence de la forme des conducteurs sur la distribution de l'électricité à leur surface..... 39
Méthode pour rendre les résultats comparables..... 42
Exemples particuliers de la distribution de l'électricité à la surface des conducteurs. — Effet des pointes... 44

CHAP. II. — Électrisation par influence ou par induction... 48
Art. I. — Phénomènes généraux d'induction électro-statique..... 48
Dans l'électrisation par induction, le corps induit ne gagne et ne perd rien..... 50
Charge permanente par induction..... 52
L'induction ne s'exerce pas à travers les conducteurs en communication avec le sol..... 56
Corps diélectriques..... 57
Art. II. — Électroscopes..... 58
Pendule électrique..... 58
Électroscope à cadran..... 59
Électroscope à feuilles d'or..... 60
La tension d'une charge donnée varie en sens inverse de l'étendue de la surface sur laquelle elle est répandue. 64
Art. III. — Appareils employés pour produire l'électricité. 65
§ I. — Machines électriques..... 65
Machine à un seul fluide..... 65
Machine à deux fluides..... 68

Expériences diverses. — Carillon électrique. — Mouvements des balles de sureau. — Décharge au moyen d'une sphère et d'une pointe. — Tube étincelant... 70
§ II. — Électrophore..... 74
Lampe électrique..... 76
§ III. — Machine hydro-électrique..... 79
Mode de production de l'électricité dans la machine hydro-électrique..... 81
Art. IV. — Rôle joué par le diélectrique dans l'induction. 84
L'induction à travers les diélectriques peut s'exercer en lignes courbes..... 84
Pouvoir inducteur spécifique des diélectriques..... 88
État moléculaire des diélectriques pendant l'induction.. 93
La quantité d'électricité développée par induction est toujours égale à celle qui existe à l'état libre sur le corps inducteur..... 99
Déductions générales..... 108
Mouvements des corps légers..... 114
Art. V. — Appareils condensateurs..... 118
Condensateur à plateaux..... 121
Mécanisme de la charge..... 122
Force condensante..... 129
Condensateur de Volta..... 133
Bouteille de Leyde..... 134
Présence des électricités contraires sur les armures de la bouteille de Leyde..... 137
Décharge de la bouteille de Leyde..... 138
Les charges du condensateur pénètrent en partie dans le diélectrique..... 142
Décharges secondaires..... 147
Rôle des armures..... 148
Charge par cascade..... 149
Carreau fulminant..... 151
Batterie électrique..... 152
Excitateur universel..... 153
Bouteille électro-métrique..... 154

Électroscope condensateur..... 156
Vent et tourniquet électriques..... 157
CHAP. III. — De la décharge électrique..... 161
ART. I. — Décharge conductive..... 163
Effets de la décharge conductive. — Fusion et volatilisation des métaux..... 163
Vitesse de propagation de la décharge..... 166
Mode de propagation de l'électricité dans la décharge conductive..... 172
ART. II. — Décharge disruptive..... 177
Effets de la décharge disruptive..... 178
Mortier électrique..... 178
Appareil de Kinnersley..... 178
Rupture des tubes de verre pleins d'eau..... 179
Perce-carte..... 180
Perce-verre..... 181
Pistolet de Volta..... 182
Transport de matières..... 183
Phénomènes électriques dans le vide..... 184
Mode de propagation de l'électricité dans la décharge disruptive..... 186
De la distance explosive dans l'air..... 191
Résistance des corps au passage de la décharge disruptive..... 195
De quelques circonstances qui influent sur la décharge disruptive..... 200
Conductibilité superficielle des corps isolants..... 202
Notes de la première section..... 206
Note A. — De l'emploi de la balance de Coulomb dans les recherches d'électricité statique..... 206
I. Lois des actions électriques à distance..... 206
II. Intensité de l'action électrique à l'unité de distance.. 210
III. Mesure des tensions électriques..... 212
Note B. — Théorie du condensateur..... 215
Expression générale de la force condensante..... 219

Deuxième section. — MAGNÉTISME 223

Phénomènes généraux 223
Pôles. — Ligne neutre..... 224
Direction d'un aimant par la terre. — Méridien magnétique. — Déclinaison : pôle nord, pôle sud. — Action réciproque des pôles de même nom et de noms contraires 226
Direction d'un aimant par un aimant..... 227
Aiguille aimantée..... 228
Action d'un barreau aimanté sur le fer doux..... 229
Action d'un barreau aimanté sur l'acier..... 232
Hypothèse des deux fluides magnétiques..... 234
Distribution des deux fluides dans un aimant..... 235
Pôle austral, pôle boréal d'un barreau..... 240
Action du globe terrestre 240
L'action du globe est purement directrice..... 240
Couple terrestre..... 241
Inclinaison du barreau..... 242
Équateur magnétique. — Sa forme générale. — Nœuds magnétiques..... 243
Détermination de la position du couple terrestre dans l'espace 244
Boussole de déclinaison..... 244
Détermination de la déclinaison..... 246
Déclinaisons observées à Paris..... 247
Variations diurnes de la déclinaison..... 247
Perturbations de la boussole de déclinaison..... 248
Boussole d'inclinaison..... 248
Détermination de la position du méridien magnétique.... 250
Inclinaisons observées à Paris..... 252
Variations diurnes de l'inclinaison..... 252
Intensité du couple terrestre..... 253
Lois des actions magnétiques 256
Force directrice de la terre..... 256

Balance magnétique..... 257
Lois de la distribution de l'intensité magnétique dans les aimants..... 258
Mesure par la balance magnétique..... 259
Méthode des oscillations..... 260
Courbe des intensités magnétiques..... 261
Position des pôles d'un aimant..... 262
Moment magnétique d'une aiguille..... 263
Lois des attractions et des répulsions magnétiques..... 264
Mesure par la balance magnétique..... 264
Méthode des oscillations..... 265
Procédés d'aimantation..... 267
Simple touche..... 267
Touche séparée..... 267
Double touche..... 268
Aimantation sous l'influence du globe terrestre..... 269
Influence de la chaleur sur le degré d'aimantation..... 270
Armures des aimants..... 272

Troisième section. — ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE..... 277

Considérations préliminaires..... 278
Expériences de Volta sur le développement d'électricité par contact des métaux hétérogènes..... 278
Force électromotrice; ses propriétés..... 280
Corps parfaits électromoteurs. — Corps imparfaits électromoteurs..... 281
Appareil électromoteur fermé..... 282
Couple de Volta..... 283
Indépendance de la force électromotrice et de l'état électrique communiqué à un des éléments du couple.. 285
Pile à colonne de Volta..... 287
Le contact ne produit pas la force électromotrice dans le couple..... 289
Véritable définition du couple voltaïque..... 290
Pile à colonne..... 291

Les extrémités de la pile à colonne ont des tensions contraires..... 293
Pôle positif et pôle négatif de la pile..... 295
L'arc interpolaire est traversé par un courant électrique continu..... 296
Définition complète de la force électromotrice..... 297
Formes diverses de la pile voltaïque..... 299
Pile à couronne..... 299
Pile à auges..... 300
Couple et pile de Wollaston..... 301
Couple et pile en hélice..... 304
CHAP. I. — Phénomènes électro-dynamiques..... 306
ART. 1er. — Action des courants sur les courants..... 306
1re *proposition*. — Deux courants parallèles se repoussent quand ils marchent en sens inverses, et s'attirent quand ils marchent dans le même sens..... 307
2e *proposition*. — Un courant sinueux produit le même effet qu'un courant rectiligne de même intensité et de même longueur en projection, etc..... 310
3e *proposition*. — Deux courants non parallèles s'attirent quand ils se rapprochent ou s'éloignent ensemble de leur point de croisement; ils se repoussent quand l'un s'éloigne, tandis que l'autre se rapproche de leur point de croisement..... 311
4e *proposition*. — Deux portions d'un même courant se repoussent mutuellement..... 313
Action des courants indéfinis fixes sur les courants finis mobiles..... 314
Démonstration par l'emploi des courants circulaires fixes..... 317
Action des courants rectilignes fixes sur les courants circulaires mobiles..... 320
Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant fermé mobile..... 322
Action d'un courant rectiligne fixe sur un solénoïde..... 327
Solénoïde dextrorsum. — Solénoïde sinistrorsum..... 328

ART. II. — Action des courants sur les barreaux aimantés.. 332
Action du courant sur l'aiguille de déclinaison..... 333
Action du courant sur l'aiguille d'inclinaison..... 335
Lois de l'action du courant sur l'aiguille aimantée..... 338
Comparaison du solénoïde et du barreau aimanté..... 341
ART. III. — Théorie du magnétisme..... 344
Aimantation par courants..... 346
Électro-aimants..... 350
Rotation des aimants sous l'influence des courants..... 352
Du courant terrestre..... 358
ART. IV. — Réaction de la terre et des aimants sur les courants..... 360
§ I. Action de la terre sur les courants..... 361
Courants verticaux..... 361
Courants horizontaux..... 363
Courants fermés..... 365
Circuits astatiques..... 367
Action de la terre sur les solénoïdes..... 368
Piles flottantes de G. de la Rive..... 369
§ II. Action des aimants sur les courants..... 370
Courants verticaux..... 370
Courants horizontaux..... 373
Courants fermés..... 373
Action d'un aimant sur le mercure traversé par un courant..... 374
ART. V. — Du galvanomètre..... 376
Multiplication du courant..... 377
Diminution de force directrice de l'aiguille..... 378
Galvanomètre..... 381
Les décharges d'électricité statique agissent sur l'aiguille aimantée..... 383
Galvanomètre différentiel..... 384

CHAP. II. — Origines de la force électromotrice..... 386
ART. I. — Actions mécaniques..... 386
Du frottement..... 387

La machine de Nairne est un véritable couple..... 389
Pression..... 391
Clivage..... 392
Art. II. — Actions chimiques..... 393
A. Combustions..... 393
B. Action des acides sur les métaux 393
C. Actions réciproques des dissolutions salines et des métaux..... 399
D. Action d'un acide sur une base..... 400
Du contact..... 401
Définition du métal positif et du métal négatif du couple..... 402
A. Couples à liquides inactifs..... 403
B. Couples à liquides actifs..... 406
C. Renversement du sens du courant..... 410
D. Couples voltaïques actifs sans contact métallique.... 410
Conclusions générales..... 412
Distribution des tensions sur les éléments du couple.... 413
Du couple et de la pile voltaïques..... 414
La force électromotrice est indépendante de l'étendue des surfaces métalliques, et ne dépend que de l'affinité du liquide pour le métal positif..... 415
Distribution des tensions dans un couple dont une extrémité communique avec le sol..... 418
Distribution des tensions dans un couple isolé..... 419
Circulation de l'électricité dans le circuit fermé d'un couple..... 422
Distribution des tensions dans une pile dont une extrémité communique avec le sol 423
Distribution des tensions dans une pile isolée..... 425
Conclusions générales..... 428
Démonstrations expérimentales des principes sur lesquels repose la théorie chimique de la pile voltaïque.... 429
Art. III. — Actions physiques..... 431
§ I Action de la chaleur sur les corps mauvais conducteurs. — Polarité électrique de la tourmaline.... 432

Action de la chaleur sur les gaz..... 438
§ II. Action de la chaleur sur les métaux..... 441
A. Circuits composés d'un seul métal..... 441
Influence de la différence de diamètre..... 443
Influence de l'état de la surface..... 444
Influence du changement de dureté du fil..... 445
Association de deux fils métalliques de même nature.. 448
Points neutres des rectangles d'antimoine et de bismuth..... 452
B. Circuits composés de deux métaux..... 453
Du couple et de la pile thermo-électriques 456
Couple bismuth et cuivre..... 456
Distribution des tensions dans la pile thermo-électrique isolée..... 459
Formes diverses de la pile thermo-électrique..... 460
Pile thermo électrique de Nobili..... 461
Pince thermo-électrique de Peltier..... 463
Aiguilles thermo-électriques de M. Becquerel..... 464
Aiguilles thermo-électriques de Dutrochet..... 465
Pyromètre magnétique de M. Pouillet..... 466
Couple et pile thermo-électriques de M. Pouillet..... 467
Couple thermo-électrique de M. J. Regnauld..... 468
CHAP. III. — Propriétés chimiques de l'électricité..... 470
Art. I. — Action chimique de l'électricité voltaïque..... 470
Nomenclature adoptée..... 471
Décomposition de l'eau..... 472
Voltamètre..... 473
Décomposition des corps oxygénés binaires..... 475
Corps binaires non oxygénés..... 477
Décomposition des sels oxygénés..... 479
Effets secondaires..... 479
Passivité des éléments métalliques 486
Caractères de la décomposition électro-chimique 487
Décomposition des corps mélangés..... 487
Influence de l'état physique des corps sur leurs propriétés électrolytiques..... 488

Rôle de l'eau dans les décompositions électro-chimiques. 493
Polarisation des électrodes..... 498
Piles secondaires..... 500
Art. II. — Action chimique des décharges électriques.... 502
Action de l'étincelle sur les gaz..... 502
Décomposition de l'eau et des sels par l'étincelle..... 504
Décomposition de l'eau et des sels par les décharges obscures..... 505
Décomposition de l'eau par l'étincelle voltaïque, et par l'étincelle des appareils d'induction..... 510
L'action chimique de l'électricité est indépendante de son origine..... 511
Art. III. — De l'ozone..... 511
Identité de l'odeur que contracte l'air en contact avec les conducteurs de la machine électrique et de celle de l'oxygène dégagé autour de l'électrode positive dans les décompositions électro-chimiques..... 512
Caractères de l'ozone..... 512
L'ozone est de l'oxygène dans un état allotropique. — Il se produit dans l'électrolyse, au contact de l'air et du phosphore, et sous l'influence des étincelles électriques. — Nature de l'ozone..... 513
Propriétés désoxygénantes de l'hydrogène dégagé autour de l'électrode négative pendant l'électrolyse..... 519
Art. IV. — Lois des décompositions électro-chimiques.. . 519
Le courant électrique a le même pouvoir chimique dans tous les points du circuit..... 520
Détermination de la loi de la décomposition électrolytique des corps binaires contenant un équivalent de chacun des éléments..... 521
Extension de cette loi aux sels neutres oxygénés dont la base contient un équivalent de métal et un équivalent d'oxygène..... 524
Équivalence du travail intérieur de la pile, générateur du courant, et du travail extérieur de décomposition effectué par le courant..... 528

Extension de la loi à tous les corps binaires.—C'est l'élément électro-négatif qui commande la loi..... 530
Extension de la loi aux sels dont les éléments de la base ne sont plus dans le rapport simple d'un équivalent de métal pour un équivalent d'oxygène, et aux sels basiques..... 531
Lois de l'action définie du courant sur les électrolytes... 532
Ces lois s'appliquent au cas où le courant traverse un mélange de plusieurs électrolytes..... 532
Conductibilité physique des liquides..... 534
Restriction à la loi de M. Faraday sur l'équivalent électrique..... 539
Du mode suivant lequel s'opère la décomposition électrolytique..... 539
Théorie de Grothus..... 540
Les électrodes métalliques n'agissent pas comme des centres d'attraction..... 542
Les gaz et les liquides peuvent jouer le rôle de véritables électrodes..... 544
Phénomènes de transport apparent des éléments des électrolytes..... 545
Art. V. — Des électromoteurs hydro-électriques.— De la pile sèche..... 549
§ I. Couple voltaïque..... 550
Actions génératrices du courant dans le couple voltaïque..... 551
Influence de l'acide azotique ajouté au liquide du couple voltaïque..... 552
Influence de la disposition de la lame métallique négative..... 553
Toute l'électricité produite dans le couple voltaïque ne passe pas, sous forme de courant, dans le circuit interpolaire..... 554
Causes de l'affaiblissement rapide du courant du couple voltaïque..... 554
Propriétés du zinc pur..... 555

Emploi du zinc amalgamé..... 557
§ II. Couples à courant constant..... 558
Couple de Daniell..... 559
Actions génératrices du courant dans le couple de Daniell..... 560
Le courant du couple est constant..... 562
Pile de Daniell..... 563
Couple de Grove..... 564
Actions génératrices du courant dans le couple de Grove..... 564
Comparaison des forces électromotrices des couples voltaïques, de Daniell, et de Grove..... 565
Couple de Bunsen..... 566
Pile de Bunsen..... 567
§ III. Couple gazeux de Grove..... 569
Actions génératrices du courant dans le couple gazeux. 571
Pile à gaz de Grove..... 572
Le travail intérieur, dans chaque couple de la pile à gaz, est égal au travail extérieur du courant dans le circuit interpolaire..... 573
Diverses combinaisons électromotrices dont les éléments sont gazeux..... 574
§ IV. Pile sèche..... 575
Propriétés particulières des piles sèches..... 577
Influence de l'humidité extérieure..... 577
Actions génératrices du courant dans la pile sèche... 578
Influence de l'humidité intérieure sur les propriétés de la pile sèche..... 578
Électroscope de Bohnenberger..... 579

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES DU TOME PREMIER.

Publications de la Librairie Victor Masson.

GAVARRET. — **Physique médicale.** De la chaleur produite par les êtres vivants. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18, avec figures dans le texte ..... 6 fr.

BOUTIGNY (d'Évreux). — **Études sur les corps à l'état sphéroïdal**, nouvelle branche de physique. Troisième édition. Paris, 1857, 1 vol. in-8, avec 26 figures intercalées dans le texte ..... 7 fr.

DELAUNAY. — **Cours élémentaire de mécanique.** 4e édit. Paris, 1857, 1 vol. gr. in-18, avec 540 fig. dans le texte. 8 fr.

DELAUNAY. — **Cours élémentaire d'astronomie**, concordant avec tous les articles du nouveau Programme officiel pour l'enseignement de la Cosmographie dans les lycées. 2e édition. Paris, 1855, 1 vol. gr. in-18, avec 389 figures dans le texte. 7 fr. 50

DELAUNAY. — **Traité de mécanique rationnelle**, contenant les éléments de mécanique exigés pour l'admission à l'École polytechnique et toute la partie théorique du cours de mécanique et machines de cette école. Deuxième édition. Paris, 1857, 1 vol. in-8, avec 127 figures dans le texte ..... 8 fr.

NIEPCE de SAINT-VICTOR. — **Traité pratique de gravure héliographique sur acier et sur verre, avec** un portrait de l'auteur gravé par ses procédés. Paris, 1856, petit in-4 .... 5 fr.

VILLE (Georges). — **Recherches expérimentales sur la végétation.** Paris, 1854, 1 vol. gr. in-4 cartonné, avec figures dans le texte et 2 pl. gravées en taille-douce par Wormser... 25 fr.

CLAVEL. — **Traité d'éducation physique et morale**, accompagné de plans d'ensemble indiquant la disposition principale des établissements d'instruction publique, par E. Muller, ingénieur civil. Paris, 1853, 2 vol. grand in-18, avec 2 cartes... 6 fr.

GEOFFROY-SAINT-HILAIRE (Is.). — **Lettres sur les substances alimentaires, et particulièrement sur la viande de cheval.** Paris, 1856, 1 vol. grand in-18 ..... 2 fr. 50

Catéchisme d'agriculture de Masson-Four. Deuxième édition entièrement refondue. Paris, 1857, 1 volume grand in-18, avec 100 figures intercalées dans le texte ..... 1 fr.

Paris. — Imprimerie de L. Martinet, rue Mignon, 2.